

2014

# **ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LA AGLOMERACIÓN DE PARTÍCULAS EN UN LECHO FLUIDIZADO**

Autor: Ángel De Prada Díaz

Tutor: Jesús Gómez Hernández

Ingeniería Industrial: Técnicas energéticas

Departamento Ingeniería térmica y de fluidos. Universidad Carlos III

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

---

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>pag 2</b>
<b>2. FLUIDIZACIÓN, PRINCIPIOS Y APLICACIONES</b>	<b>pag 4</b>
<b>3. CONCEPTOS TEÓRICOS FLUIDIZACIÓN</b>	<b>pag 27</b>
<b>4. BURBUJAS EN LECHOS FLUIDOS Y CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS</b>	<b>pag 30</b>
<b>5. MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SEÑAL</b>	<b>pag 35</b>
<b>6. EQUIPO Y TOMA DE DATOS</b>	<b>pag 41</b>
<b>7. CÁLCULOS Y RESULTADOS</b>	<b>pag 44</b>
<b>8. CONCLUSIONES</b>	<b>pag 62</b>
<b>9. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>pag 64</b>
<b>10. ANEXO</b>	<b>pag 65</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

Muchos han sido los estudios y aplicaciones realizadas acerca del fenómeno de la fluidización de partículas sólidas desde el primer cuarto del siglo pasado. Para establecer una primera toma de contacto con el fenómeno, podemos definir éste en términos de un simple experimento en el que un lecho de partículas sólidas es mantenido en suspensión por una corriente de gas o líquido que pasa a través de ellas. El comportamiento de dichas partículas guarda ciertas similitudes con el comportamiento de un fluido, de ahí la denominación de “Lecho Fluidizado”. El interés despertado por las buenas propiedades de los lechos fluidos para determinados procesos industriales, ha llevado a numerosos investigadores a desarrollar estudios, técnicas de caracterización y desarrollo de aplicaciones. La gran dificultad que entraña la caracterización y el conocimiento de lo que ocurre en el interior del lecho fluidizado hace que existan diversos estudios que finalizan en diferentes correlaciones, técnicas y conclusiones.

A lo largo del presente proyecto se tratará el fenómeno de la fluidización desde el punto de vista experimental, aunque se dedicará una parte del mismo a ofrecer una visión teórica aplicando conocimientos de ingeniería de fluidos.

Para elaborar la caracterización de un lecho fluido, se han desarrollado métodos experimentales basados en el estudio de las fluctuaciones de presión así como la variación de la humedad en las partículas que componen el lecho. Los métodos que se usan en el presente proyecto son los siguientes:

- Fluctuaciones de presión: su aplicación es sencilla y se puede caracterizar el comportamiento del lecho fluidizado utilizando herramientas lineales en el dominio del tiempo. Mediante la desviación típica de las fluctuaciones de presión se obtiene la velocidad de mínima fluidización.
- Variaciones de humedad en las partículas fluidas y el aire: a través de las medidas de humedad correspondientes se realiza una primera aproximación para la caracterización y la modelación del proceso de secado.

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

---

## 1.1 OBJETIVO DEL ESTUDIO

El objetivo del estudio es obtener la velocidad de mínima fluidización de un lecho por medio de métodos matemáticos para la implantación en futuras plantas. Del mismo se realizará un estudio en el dominio del tiempo y en el dominio de frecuencias de modo que se pueda obtener, sin necesidad de contacto visual, si el lecho se encuentra fluidizado.

## 1.2 ALCANCE DEL ESTUDIO

El presente proyecto se centra caracterizar las propiedades físicas de un lecho fluidizado, así como el estudio de la desaparición del mismo y su posterior recuperación. El proyecto se divide en:

- Introducción y adquisición de conocimientos teóricos del fenómeno de la fluidización así como de las técnicas de medida y caracterización de lechos utilizadas.
- Caracterización del lecho a través de medidas de fluctuaciones de presión en el mismo. A partir de estos datos se procederá al tratamiento de estos y se determinará los parámetros característicos del lecho.

## 1.3 ESTRUCTURA DEL PROYECTO

El presente proyecto se encontrará dividido en 4 bloques, siendo el primero de ellos para conocer y estudiar las características y propiedades de un lecho fluidizado, así como sus usos y aplicaciones. En el segundo se describirán los procesos para la realización de toma de datos y la propia descripción del proceso de adquisición realizado. El tercer bloque consistirá en el análisis matemático de los datos obtenidos y sus diversas representaciones. Y por último se presentarán las conclusiones obtenidas en los diferentes estudios realizados.

## 2. FLUIDIZACIÓN: PRINCIPIOS Y APLICACIONES

El presente capítulo se ofrece una visión global y sencilla sobre el fenómeno de la fluidización atendiendo al conocimiento y la caracterización de lo que ocurre en el interior de un lecho fluido. Así mismo se ofrecerá una pequeña visión teórica para el cálculo de la caída de presión y la velocidad mínima de fluidización, para comprender lo complejo que resulta el estudio teórico aplicando conocimientos sobre ingeniería de fluidos. A su vez se presenta la fluidización como aplicación industrial dando una visión de las ventajas e inconvenientes y describiendo algunas de sus aplicaciones.

La historia de la fluidización es bastante turbulenta. Aunque su primer uso comercial data de 1926, golpeó la escena industrial en 1942 con su utilización en el proceso de craqueo catalítico. Desde entonces muchos han sido los esfuerzos de investigación que han desembocado en numerosas teorías y experimentos en los que podemos apoyarnos, pero también han existido muchos fracasos. Lamentablemente existe todavía mucha confusión y contradicción entre los resultados y conclusiones de los diferentes investigadores que han realizado trabajos al respecto, dejando un debate abierto en la obtención de conocimientos y teorías sobre muchos aspectos de la fluidización. Por otra parte cabe destacar que la mayoría de los experimentos han sido realizados en lechos a pequeña escala, lo que ha supuesto otra incógnita ya que cuando se han extrapolado los resultados para la construcción de instalaciones de tamaño real éstos han variado significativamente suponiendo un paso atrás en el diseño. Por lo tanto es muy importante desarrollar minuciosamente una instalación conociendo profundamente el fenómeno de la fluidización

### 2.1 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO

La fluidización es el fenómeno por el cual se consigue que un lecho de partículas sólidas se suspenda en el seno de un gas o líquido al hacerlo pasar entre ellas, adquiriendo un comportamiento semejante al de un fluido.

Las características del flujo que pasa a través de las partículas sólidas del lecho serán determinantes para controlar el comportamiento del mismo y distinguir diferentes regímenes de funcionamiento.

Para explicarlo de una manera sencilla, de aquí en adelante imaginemos que tenemos un lecho de partículas sólidas dentro de un cilindro vertical e inyectamos aire a una cierta velocidad por la parte inferior del mismo.

Si el fluido en movimiento asciende a baja velocidad, en principio éste se filtra a través de los espacios entre las partículas, que permanecen estacionarios; este estado se denomina “lecho fijo” (*figura 1 (a)*). Con un incremento en la velocidad del fluido, las partículas se mueven de forma independiente por medio de pequeñas vibraciones.

Si se sigue aumentando la velocidad, se alcanza un punto donde todas las partículas se encuentran suspendidas por el flujo ascendente de gas o líquido. En este punto la fuerza de fricción entre el fluido y las partículas se equilibra con el peso de éstas, desapareciendo entonces la componente vertical de la fuerza de compresión entre partículas adyacentes. De este modo, la pérdida de carga a través de un volumen determinado del lecho es igual al peso de las partículas existentes por unidad de área. Este estado se denomina “lecho en comienzo de fluidización”, aunque si hacemos una traducción literal de la bibliografía lo podemos denominar “fluidización incipiente” o “lecho en mínima fluidización” (*figura 1 (b)*). Este punto marca la transición entre el lecho fijo y el lecho plenamente fluidizado, y la velocidad superficial del fluido se denomina velocidad de mínima fluidización  $U_{mf}$ .

Un incremento de la velocidad por encima de la mínima fluidización provoca un comportamiento diferente en el lecho dependiendo del sistema: líquido-sólido o gas-sólido. En el primer tipo de sistema un incremento en la velocidad por encima de la de mínima fluidización, normalmente da lugar a una suave y progresiva expansión del lecho, las posibles inestabilidades provocadas por un flujo irregular se amortiguan y en condiciones normales no se observan heterogeneidades ni formación de burbujas en el lecho. Un lecho con estas características se denomina de “fluidización particulada”, “no burbujeante” u “homogénea” (*figura 1 (c)*). Sin embargo, en sistemas gas-sólido, éste tipo de fluidización sólo tiene lugar en ciertos casos de partículas muy ligeras con gas denso a alta presión. Generalmente el comportamiento de los sistemas fluidizados por gas es bastante diferente; si se incrementa la velocidad del gas por encima de la correspondiente a la de mínima fluidización se observan grandes inestabilidades con aparición de burbujas y canales. A mayores velocidades, la agitación pasa a ser más violenta y el movimiento de las partículas más vigoroso, y el lecho no se expande mucho más de su volumen de mínima fluidización. Este comportamiento se denomina “fluidización agregativa”, “burbujeante” o “heterogénea” (*figura 1 (d)*). En raros casos se puede reproducir este comportamiento en sistemas líquido-sólido, ocurriendo sólo si para su fluidización se emplean sólidos muy densos y líquidos de baja densidad.

Otro fenómeno que ocurre en sistemas gas-sólido es la aparición de burbujas de gas que se mueven ascendentemente entre las partículas. Las burbujas de gas al ascender por el lecho crecen y se produce la coalescencia de las mismas. En ocasiones, en lechos de gran longitud y pequeño diámetro las burbujas pueden llegar a ser tan grandes como el diámetro de la columna que contiene el lecho. Este fenómeno se conoce como *slugging*, y las burbujas producidas se denominan *slugs*. Si se utilizan partículas finas, éstas caen suavemente hacia abajo rodeando las burbujas, lo que da lugar a burbujas de mayor tamaño. El fenómeno se conoce con el nombre de *slugging* con *slugs* axiales (*figura 1(e)*). Para partículas más grandes, la fracción de lecho por encima de las burbujas es empujada hacia arriba con un movimiento semejante al de un pistón. Las partículas caen desde el slug cuando éste se desintegra al llegar a la superficie. A partir de dicho instante aparece un nuevo slug repitiéndose continuamente

## ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

este movimiento inestable. Éste comportamiento se denomina slugging con slugs de pared (figura 1 (f)).

El slugging se debe tener especialmente en cuenta en el diseño de lechos fluidizados largos y estrechos.

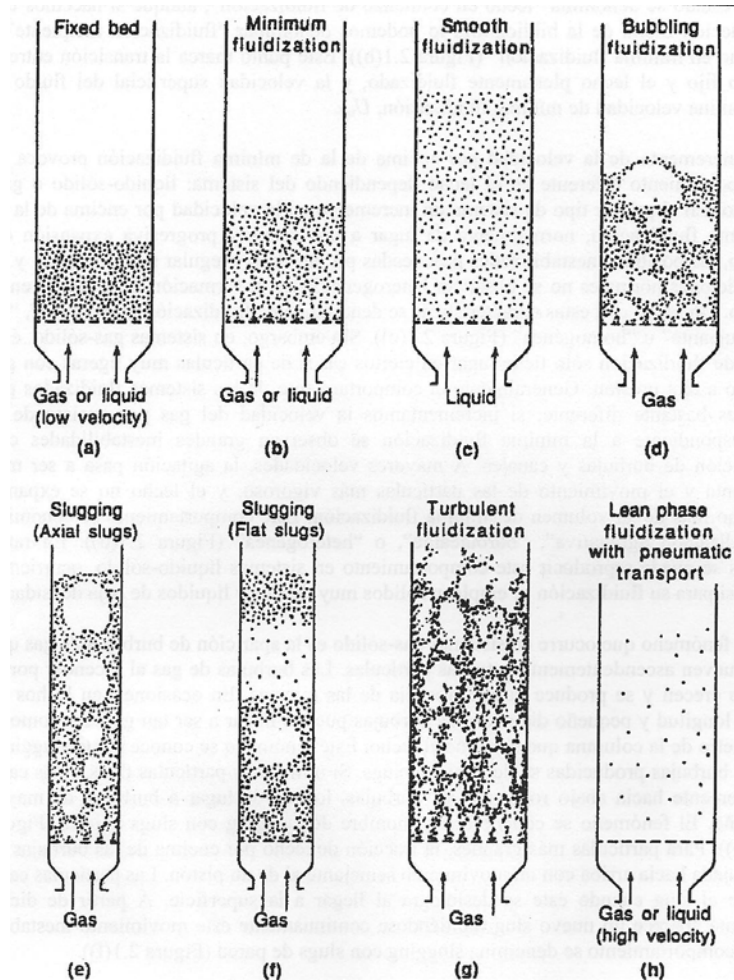


Figura 1. Diferentes modelos de contacto entre el lecho de partículas y el fluido. (a) Lecho fijo; (b) lecho en comienzo de fluidización; (c) Lecho con fluidización no burbujeante; (d) Lecho con fluidización burbujeante; (e) Slugging con slugs axiales; (f) Slugging con slugs de pared; (g) Fluidización turbulenta; (h) Fluidización en fase dispersa con transporte neumático de partículas [1]

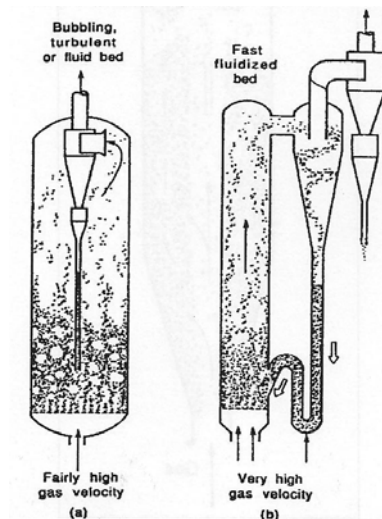
Cuando en sistemas gas-sólido aumentamos la velocidad del gas considerablemente podemos llegar a superar el valor de la velocidad terminal de los sólidos, produciéndose el arrastre de partículas desapareciendo la superficie superior del lecho. En este régimen se observa un movimiento turbulento de sólidos y burbujas de gas de diversos tamaños y de formas. Este estado se denomina “lecho fluidizado turbulento” (figura 1 (g)). Con un aumento en la velocidad del gas aún mayor, las partículas son transportadas por el mismo expulsándolas fuera del lecho. En este estado se tiene un “lecho fluidizado disperso”, “diluido” o “en fase dispersa”, con transporte neumático de sólidos (figura 1 (h)). El término fluidización hace

## ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

---

referencia tanto a sistemas de fase densa como a sistemas de fase dispersa, así como a sistemas de transporte neumático.

Tanto en la fluidización turbulenta como en la fase dispersa se pueden arrastrar grandes cantidades de partículas que es necesario recuperar y devolver al lecho. En los lechos en los que se utiliza estos regímenes se emplean sistemas que devuelven las partículas arrastradas al interior con la ayuda de ciclones. Los ciclones son elementos de sedimentación por fuerza centrífuga. En los lechos fluidizados turbulentos con arrastre moderado de partículas se utilizan ciclones internos (*figura 2 (a)*). En los lechos fluidizados de fase dispersa, donde el arrastre de partículas es mayor, normalmente se emplean grandes ciclones fuera del lecho (*figura 2 (b)*). En general, en los lechos fluidizados circulantes es necesario para el correcto desarrollo de las operaciones que la recirculación de las partículas a través de los elementos de retención sea suave y uniforme. Los sistemas que emplean ciclones para la recuperación de partículas se conocen con el nombre de lechos fluidizados circulantes.



*Figura 2. Lechos fluidos circulantes. (a) Lecho fluidizado turbulento con ciclón interno; (b) Lecho fluidizado en fase dispersa con ciclón externo. [1]*

Otro fenómeno que se puede producir en el contacto gas-sólido es un chorro de gas que se abre paso entre el lecho. Esto es denominado “lecho de chorro” o “spouted bed” (*figura 3*). Si se opera el gas a alta velocidad, éste penetra a través del lecho de partículas transportando así algunas de ellas hasta la parte alta del lecho. El resto de partículas caen lentamente alrededor del chorro y entre el gas que se filtra con suavidad hacia arriba. En ocasiones se observa una combinación de comportamientos entre burbujeante y de chorro, que se le suele denominar “lecho fluidizado de chorro”.

Comparado con otros métodos de contacto gas-sólido, los lechos fluidizados tienen algunas propiedades características y de gran utilidad. En el caso de lechos fluidizados de líquido-sólido la utilidad es menor por razones asociadas a su comportamiento, de modo que hasta ahora las



aplicaciones industriales de fluidización más importantes están basadas en sistemas de tipo gas-sólido.

Aunque el comportamiento o régimen de funcionamiento está fuertemente influenciado por la velocidad superficial del gas o del líquido empleado, en el capítulo 4 se verá como las características de las partículas utilizadas deben de ser cuidadosamente elegidas para cada fin ya que delimitan el tipo de operación.

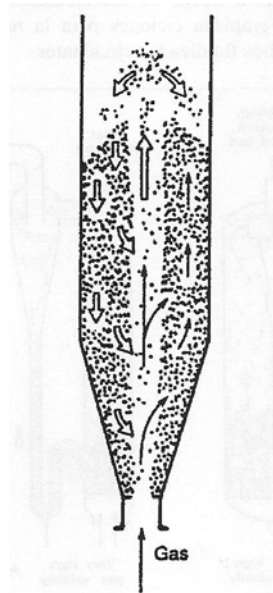


Figura 3. Lecho de chorro. [1]

## 2.2 COMPORTAMIENTO DE UN LECHO FLUIDO

Con sencillos experimentos podemos ilustrar el comportamiento de un lecho fluido. A continuación se describen comportamientos de los lechos fluidos semejantes al de los líquidos.

Un lecho de partículas de fase densa fluidizado con gas se asemeja mucho a un líquido en ebullición y, en muchos aspectos, muestra un comportamiento similar al de un fluido. De esta manera, un objeto de tamaño grande y poca densidad que se sumerge en el lecho fluidizado aparece inmediatamente en la superficie al dejarlo libre y flota. Al contrario, si tenemos un lecho fluido e introducimos un objeto de mayor densidad éste se hundirá rápidamente (*figura 4 (a)*).

Si tenemos un recipiente con líquido y lo inclinamos éste iguala el nivel de su superficie permaneciendo horizontal. De igual forma, en un lecho fluido la superficie permanece horizontal si lo inclinamos (*figura 4 (b)*).

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Ahora, si consideramos el comportamiento del flujo de un líquido cuando hacemos un orificio en el recipiente que lo contiene, éste sale en forma de chorro. Ocurre lo mismo en un lecho fluido en el que practicamos un agujero (figura 4 (c)).

En el caso de tener dos lechos fluidizados comunicados entre sí, se iguala el nivel de ambos (figura 5 (a)). Además, la diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia de altura entre ellos, igual que ocurre en fluido-estática (figura 5 (b)).

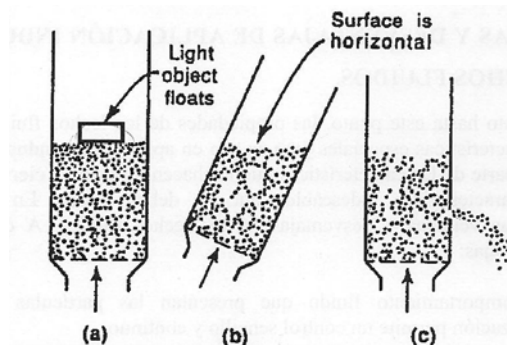


Figura 4. Comportamiento fluido de un lecho de partículas fluidizado . [1]

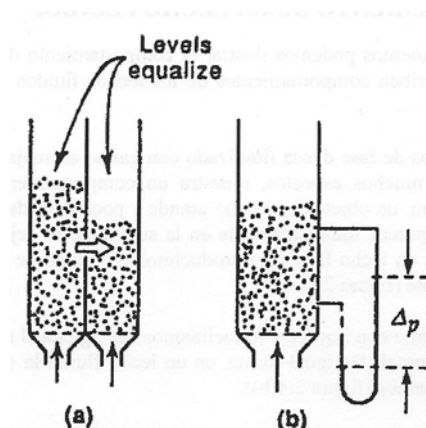


Figura 5. Comportamiento fluido de un lecho de partículas fluidizado . [1]

Conociendo el comportamiento fluido que presentan los lechos fluidizados podemos diseñar aplicaciones industriales atendiendo a sus propiedades, así como al tipo de contacto.

## 2.3 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE APLICACIÓN INDUSTRIAL DE LOS LECHOS FLUIDOS

Como se ha visto hasta este punto, las propiedades de los lechos fluidos confieren a estos ciertas características especiales para su uso en aplicaciones industriales. Durante su operación, a parte de las características que les hacen útiles para ciertas aplicaciones existen otras características indeseables que se deben evitar. En este apartado se enumeran las ventajas y desventajas de los lechos fluidos. A continuación se presentan las ventajas:

- ❖ El comportamiento fluido que presentan las partículas en estado de fluidización permite un control sencillo y continuo.
- ❖ El mezclado rápido de las partículas permite alcanzar iguales condiciones de temperatura en el lecho, lo que conlleva un control sencillo y seguro de operaciones isotérmicas.
- ❖ Un lecho con partículas bien mezcladas resiste las rápidas variaciones de temperatura, y responde lentamente a los cambios bruscos en las condiciones de operación y ofrece un gran margen de seguridad, evitando pérdidas de temperatura en reacciones altamente exotérmicas.
- ❖ La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible conservar (o suministrar), grandes cantidades de calor que se puedan producir (o necesitar), en grandes reactores.
- ❖ Los lechos fluidos se pueden utilizar en operaciones de gran tamaño.
- ❖ Las velocidades de transferencia de calor y masa entre el gas y las partículas son mayores comparados con otros modos de contacto.
- ❖ La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en su interior es alta, con lo cual los intercambios de calor en los lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente baja.

En contraposición con las ventajas del uso de los lechos fluidos en aplicaciones industriales, existen una serie de desventajas:

- ❖ La presencia de burbujas en lechos burbujeantes disminuye el mezclado entre la fase densa y el gas que atraviesa el lecho en forma de burbujas.
- ❖ El rápido mezclado de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variables. El tratamiento continuo de sólidos proporciona productos no uniformes y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión.
- ❖ La erosión en depósitos y tuberías debida a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. Por otra parte, las partículas finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser reemplazadas.
- ❖ En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de las partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de forma considerable.

El menor coste de operación de los lechos fluidizados frente a otros reactores es el principal incentivo para su aplicación en la industria.

## 2.4 APLICACIONES DE LA FLUIDIZACIÓN

Gracias a las buenas propiedades que presentan los lechos fluidizados su uso se ha extendido en el ámbito industrial. Desde la aparición del primer gasificador de carbón en 1926, se han desarrollado muchas aplicaciones industriales basadas en la fluidización. A lo largo de su corta historia, se han desarrollado principalmente aplicaciones para la industria petroquímica y metalúrgica.

A lo largo de este apartado se realizará un repaso por las diversas aplicaciones actuales de la fluidización. Podemos clasificar los procesos según su naturaleza en operaciones físicas, reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos, combustión e incineración, carbonización y gasificación, calcinación, reacción con sólidos, y biofluidización. A la vista de la clasificación se puede comprobar que el uso de los lechos para aplicaciones térmicas juega un papel muy importante.

### 2.4.1. OPERACIONES FÍSICAS

#### 2.4.1.1. Intercambio de calor.

Por su capacidad de intercambio rápido de calor así como de mantener constante la temperatura, los lechos fluidizados se utilizan desde hace tiempo como intercambiadores de calor. Suelen ser también utilizados para conseguir ciertas propiedades en tratamientos de metales a través del control de su enfriamiento después de ser sometidos a un proceso de calentamiento o de forja (*figura 6 (a)*).

En cuanto a los intercambiadores de calor, el intercambio puede producirse sin contacto entre las partículas y el gas de refrigeración que circula por tubos en el interior del lecho fluidizado (*figura 6 (b)*). Un intercambio que se utiliza comúnmente consiste en hacer circular agua a través de tubos sumergidos en un lecho fluidizado de partículas a alta temperatura recuperando el calor contenido en éstas para producir vapor (*figura 6 (c)*).

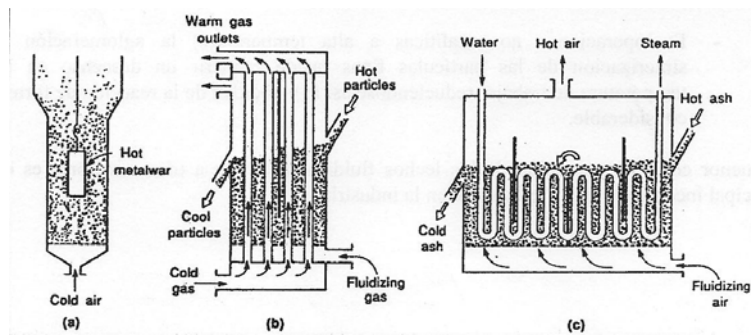


Figura 6. Intercambiadores de calor de lecho fluidizado. (a) Enfriamiento rápido de metales; (b) Intercambio de calor indirecto entre gas y partículas; (c) Generación de vapor a partir de ceniza caliente. [1]

## 2.4.1.2. Recubrimiento de metales.

El recubrimiento plástico de metales se consigue mediante un lecho fluido formado por pequeñas partículas de plástico en las cuales se sumerge un metal caliente a una temperatura superior a la de fusión del plástico. De esta manera el plástico se queda adherido a la superficie del metal formando una capa que aumenta exponencialmente con el tiempo de estancia del metal caliente en el lecho.

Debido a que el acabado del plástico adherido es rugoso, posteriormente se realiza un tratamiento de alisado consistente en introducir la pieza plastificada en una corriente de aire caliente. Este proceso puede utilizarse para piezas con formas complejas. El proceso económico y el uso del material es completo.

## 2.4.1.4. Secado de sólidos.

Los secadores de lecho fluido se usan en gran número de aplicaciones industriales debido a su gran capacidad, su bajo coste de construcción, su fácil operación y su alta eficiencia térmica. Se pueden emplear para secar cualquier tipo de sólido húmedo, minerales, arena, polímeros, productos farmacéuticos o fertilizantes, siempre que estos puedan ser fluidizados con gas caliente. Las acerías utilizan grandes secadores para secar el carbón antes de introducirlo en los hornos. También se utilizan secadores de menor tamaño pero no de menor eficiencia en la industria farmacéutica y otras pequeñas industrias químicas.

Para secar materiales inorgánicos se suelen utilizar lechos de una sola etapa (figura 7 (a)). No se controla el tiempo de residencia de las partículas en el lecho porque no es importante, ya que sólo es suficiente con mantener la temperatura del lecho entre los 60°C y 90°C hasta que se evapora el vapor de agua contenido en los sólidos.

## ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Cuando las partículas requieren tiempos de secado específicos, o los materiales son muy delicados, como productos farmacéuticos que requieren tiempos idénticos de secado, el tiempo de residencia es importante y se debe controlar. En este caso se necesitarán lechos multietapas o lechos con distribuidores rotativos (*figura 7 (b) y (c)*), ya que con un lecho de una sola etapa pueden existir partículas que atraviesan rápidamente el lecho sin que exista apenas contacto con el gas.

El secado de sólidos se realiza mediante fluidización con aire caliente, aunque existen diseños en los que el calor se aporta mediante conductos sumergidos en el lecho, reduciendo el volumen de gas necesario. Para aplicaciones en las que se requiere mayor eficiencia, por ejemplo en secado de sólidos muy húmedos, podemos fluidizar con vapor sobrecalentado a alta presión.

Para sólidos que contienen cantidades considerables de disolventes como metanol o tolueno, presentando cierto riesgo de explosión, se emplea gas inerte, vapor de agua o el propio vapor del disolvente en un sistema cerrado con intercambiadores de tubos (*figura 7 (d)*).

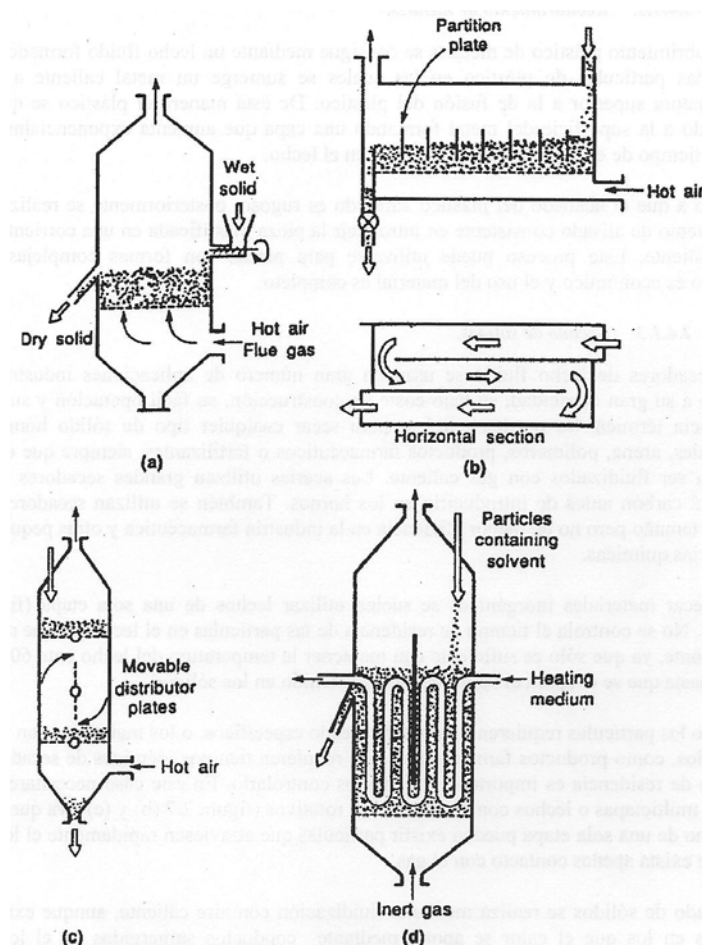


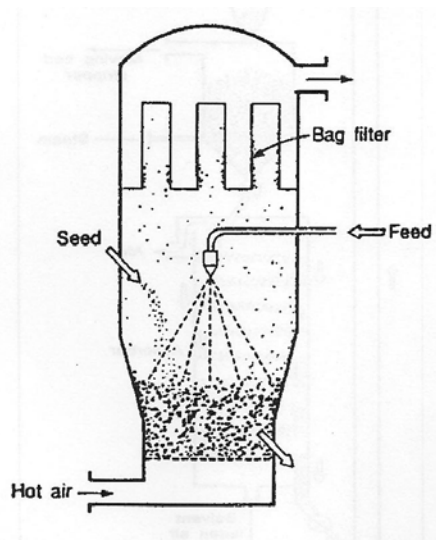
Figura 7. Procesos de secado con fluidización (a) Una sola etapa; (b) Multietapa; (c) Distribuidor rotatorio para asegurar tiempos de residencia uniformes; (d) Diseño para partículas que contienen disolventes. [1]

Cuando los sólidos que tenemos que secar son pegajosos o se apelmazan con facilidad, se emplean lechos fluidos vibratorios en los que el distribuidor de aire vibra impidiendo que los sólidos se aglomeren.

### 2.4.1.4. Recubrimiento de objetos y crecimiento de partículas.

Cuando una solución de sal, como el glutamato sódico (el glutamato monosódico es la sal del aminoácido conocido como ácido glutámico o glutamato, que se encuentra de forma natural en numerosos alimentos como los tomates, setas, verduras e incluso en la leche materna), es inyectado o rociado en un lecho caliente de partículas secas, como el cloruro sódico, las superficies de las partículas se humedecen. El consecuente secado de la capa líquida proporciona un eficiente proceso de recubrimiento (por ejemplo, la sal de mesa se prepara de esta forma). Este tipo de operación también es usado para recubrir soluciones de sal o de las mezclas de alimentos sólidos finos. En la *figura 8* se muestra un ejemplo de este tipo de operación.

El tamaño de producto y su distribución pueden ser controlados por el tamaño de las partículas de semilla, y ajustando la proporción de líquido-sólido.



*Figura 8. Recubrimiento y/o crecimiento de partículas . [1]*

Por otra parte, la solución que se rocía o se inyecta puede actuar como medio para partículas que se aglomeran por sequedad. En estas operaciones, es importante conocer el mecanismo de aglomeración.

Para un diseño correcto es necesario tener en cuenta ciertos aspectos tales como la posición apropiada del rociador, para evitar la aglomeración imprevista de alimentos sólidos y evitar que las paredes del lecho se recubran de sólidos.

### 2.4.1.5 Adsorción.

En ocasiones es necesario eliminar componentes muy diluidos en grandes flujos de gas. En estos casos, los procesos continuos de adsorción mediante fluidización a través de múltiples etapas llegan a ser muy efectivos. En la adsorción por lecho fluidizado los componentes se adsorben de forma periódica con partículas de carbón activo y se eliminan posteriormente con vapor. Los ciclos de adsorción y desorción (regeneración del carbón activo), se llevan a cabo en el mismo lecho. Ejemplos de aplicación son la retirada y concentración de solventes como disulfuro de carbono, acetona, etanol y acetato de etilo, o la eliminación de trazas contaminantes en gases residuales. En la siguiente figura se puede observar una instalación de adsorción en lecho fluido.

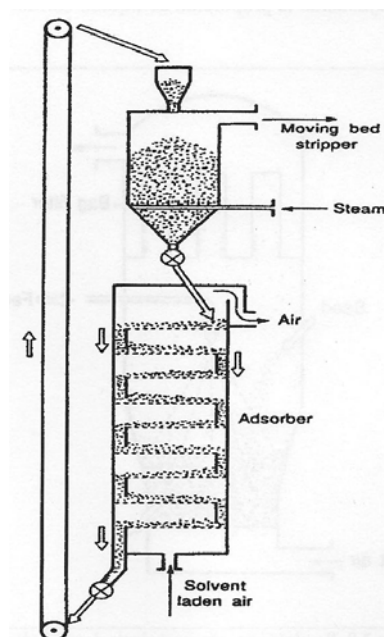


Figura 9. Adsorción en un lecho fluidizado. [1]



## 2.4.2. REACCIONES DE SÍNTESIS

La necesidad de mantener un estricto control de la temperatura en la zona en la que se produce la reacción hace que el uso de lechos fluidizados en fase gas con catalizadores sólidos suponga una gran ventaja frente a los lechos fijos. Dicha necesidad está justificada por las siguientes razones:

- ❖ La operación puede ser explosiva fuera de un estrecho rango de temperaturas.
- ❖ La obtención de los productos deseados es dependiente de la temperatura de la operación.
- ❖ La concentración de alta temperaturas en el catalizador puede producir su rápido deterioro.
- ❖ Las reacciones son exotérmicas lo que hace muy difícil el control de la temperatura.

Debido a que los gases presentan malos coeficientes de transferencia de calor y muy bajos valores de capacidad calorífica, comparados con sus calores de reacción, resulta difícil alcanzar el control de temperatura necesario utilizando lechos fijos. En estos sistemas son necesarias extensa superficies de intercambio de calor y grandes diluciones de gases reactantes. Este control es mucho más fácil de conseguir en lechos fluidizados porque la rápida circulación de las partículas, con una capacidad calorífica relativamente alta, distribuye el calor y ayuda a eliminar posibles zonas de alta concentración de calor.

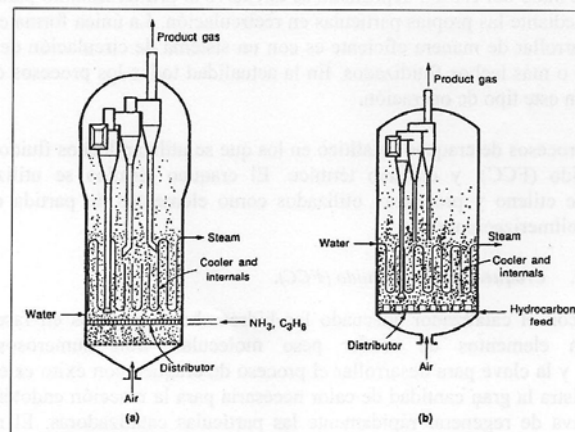


Figura 2.10. Reactores para reacciones altamente exotérmicas. (a) Sohio, producción de acrilonitrilo; (b) Mitsubirhi Chemical, [1]

Figura 10. Reactores para reacciones altamente exotérmicas. [1]

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

---

Year	Product or Reaction	Process	Type
1945	Phthalic anhydride	Sherwin-Williams-Badger	FB
1955	Fischer-Tropsch synthesis	Kellogg, Sasol	FFB
1956	Vinyl acetate	Nihon Gosei	FB
1960	Acrylonitrile	Sohio	FB
1961	Ethylene dichloride	Monsanto	FB
1965	Chloromethane	Asahi Chemical	FB
1970	Maleic anhydride	Mitsubishi Chemical	FB
1977	Polyethylene (low density)	Union Carbide	BB
1984	Polypropylene	Mitsui Petrochemical	BB
1984	<i>o</i> -cresol and 2,6-xyleneol	Ashai Chemical	FB

Tabla 1. Catalizadores catalíticos comerciales con lecho fluidizado. FB: Lechos fluidos de partículas finas; FFB: Lechos fluidos rápidos; BB Lechos fluidos burbujeantes para partículas grandes. [1]

## 2.4.3. CRAQUEO DE HIDROCARBUROS

La rotura catalítica de hidrocarburos en elementos de menor peso molecular, denominadas reacciones de craqueo, está dominada por dos características fundamentales, las reacciones son endotérmicas, y en las superficies de los sólidos cercanos se deposita carbono. Estas características junto con las grandes cantidades de material a tratar determinan el tipo de proceso utilizado industrialmente para estas reacciones. Básicamente, estos procesos se dividen en dos partes:

- ❖ Absorción de calor, reacción y deposición de carbono.
- ❖ El carbono depositado se quema y se recupera el calor.

El calor recuperado del carbón depositado se devuelve al primer módulo para alimentar la reacción mediante las propias partículas en recirculación. La única forma en que este proceso se puede desarrollar de manera eficiente es con un sistema de circulación de partículas mediante uno o más lechos fluidizados. En la actualidad todos los procesos de craqueo se realizan con este tipo de operación.

Existen dos procesos de craqueo catalítico en los que se utilizan lechos fluidos: craqueo catalítico fluido (FCC), y craqueo térmico. El craqueo térmico se utiliza para la producción de etileno y propileno, utilizados como elementos de partida en síntesis orgánicas y polimerizaciones.

### 2.4.3.1. Craqueo catalítico fluido (FCC)

En contacto con el catalizador adecuado los hidrocarburos pesados en fase vapor se “rompen” en elementos de menor peso molecular. Son numerosos factores involucrados, y la clave para desarrollar el proceso de craqueo con éxito es el modo en que se suministra la gran cantidad de calor necesaria para la reacción endotérmica, y la manera efectiva de regenerar rápidamente las partículas catalizadoras. El método de craqueo catalítico fluido lleva a cabo simultáneamente la regeneración de las partículas catalizadoras y el aporte de calor de

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

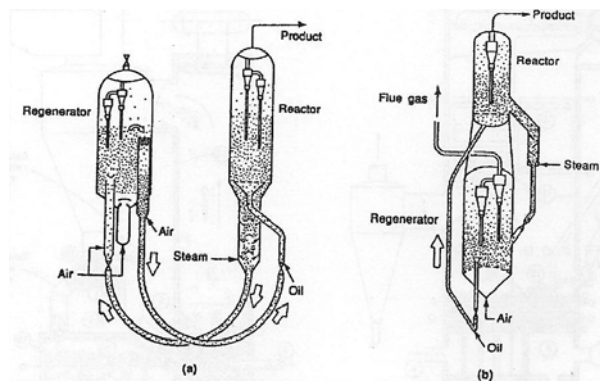
---

reacción. Por ello, el proceso FCC es el de aplicación más extensa en el craqueo de hidrocarburos.

La principal característica de este proceso es la unión de las dos unidades: primero, un reactor a una temperatura entre 480°C y 540°C, donde el petróleo suministrado en fase vapor se fragmenta en contacto con las partículas catalizadoras a alta temperatura. Después de un determinado tiempo de residencia, las partículas se transportan al regenerador que se encuentra alrededor de 580°C, y es allí donde los depósitos de carbono se queman y se reducen desde el 1-2% hasta el 0.4-0.8%. las partículas calientes después de 5-10 min se devuelven al reactor.

Como se puede comprobar, las características de generador, el reactor, y el transporte de partículas entre procesos hace ventajoso el uso de lechos fluidizados.

En modelo Exxon's II fue la primera unidad FCC utilizada con éxito industrial y desde entonces sucesivas mejoras y nuevos diseños para aumentar la capacidad han dado con los modelos actuales. Numerosas son las compañías y laboratorios que han desarrollado sus propias unidades de craqueo pero el fundamento en todos los casos es el mismo y se emplean lechos fluidizados. Las mejoras introducidas se encaminan hacia el diseño del transporte y el uso de diferentes tamaños y tipos de catalizador así como acople entre el generador y el reactor. En la *figura 11* se muestran algunos diseños.



*Figura 11. Unidad de craqueo catalítico. (a) Modelo Exxon IV; (b) Modelo diseñado por Universidad Oil Products Company [1]*

## 2.4.4. COMBUSTIÓN E INCINERACIÓN

### 2.4.4.1. Combustión de carbón en lecho fluido

A comienzos de los años 1970s empezó a desarrollarse la combustión en lecho fluidizado (FBC), por varias potencias tecnológicas debido a la crisis del petróleo. El objetivo era alcanzar una forma óptima de combustión del carbón de baja calidad y combustibles que no se pudieran quemar en calderas convencionales como alternativa al petróleo. Se desarrollaron unidades relativamente compactas y viablemente económicas que en determinadas circunstancias locales obtenían una combustión eficiente.

Uno de los primeros diseños estaba basado en un lecho fluidizado burbujeante a presión atmosférica. En primer lugar se fluidizan partículas de caliza o dolomita con aire, y posteriormente se introducen partículas pequeñas de carbón (3-6mm). Debido a la velocidad del gas se pierden partículas que suelen contener carbón sin quemar. Para evitar su emisión al ambiente se deben atrapar mediante ciclones.

Las partículas de caliza y dolomita capturan bien los componentes de azufre si el lecho la mantenemos a  $\approx 850^{\circ}\text{C}$ , y por lo tanto los intercambiadores de calor pueden ir en el interior del propio lecho. Para obtener un mejor rendimiento también se instalan intercambiadores a la salida de los gases para aprovechar el calor residual.

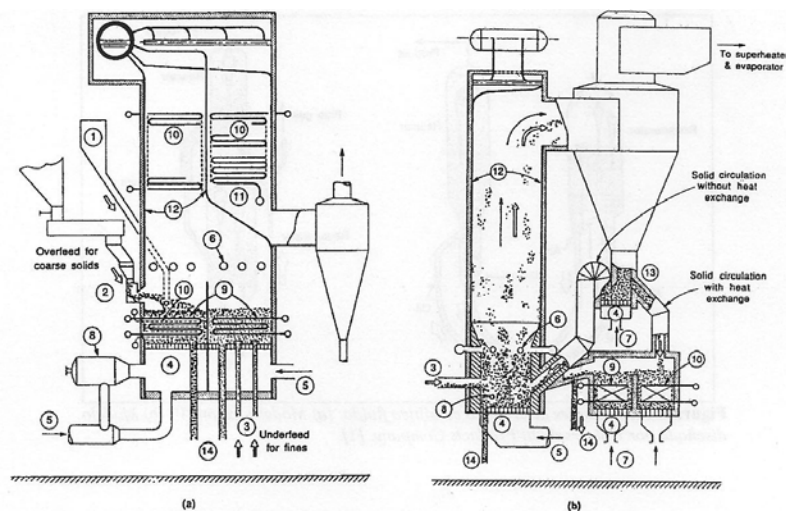


Figura 12. Combustión de carbón con lecho fluidizado. (a) Lecho burbujeante; (b) Circulación de sólidos. 1. Tolva de caliza; 2. Conducto de alimentación; 3. Alimentación de carbón-caliza; 4. Distribuidor de aire; 5. Entrada de aire principal; 6. Boquilla de aire secundaria; 8. Generador de gas a alta temperatura; 9. Evaporador; 10. Sobrecalentador; 11. Economizador; 12. Circulación de agua; 14. Conducto de retirada de residuos. [1]

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

---

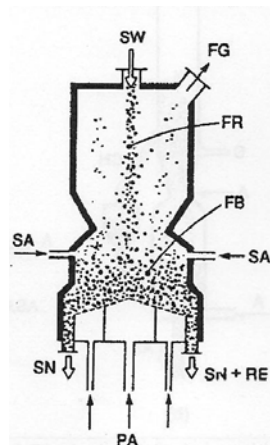
Los lechos generan menos  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ , ya que son capaces de trabajar a menor temperatura. Existen numerosos diseños comerciales que emplean diferentes técnicas a la comentada; unidades a pequeña y a gran escala, a presión atmosférica o a alta presión. En la *figura 12* se muestran dos modelos de combustión de carbón.

## 2.4.4.2. Incineración de residuos sólidos

En áreas pobladas es inevitable la incineración de residuos sólidos urbanos utilizándose normalmente quemadores de parrilla. Dichos sistemas son problemáticos en determinadas ocasiones debido a la emisión de fuertes olores, a pesar de ser eficientes térmicamente.

Los problemas asociados se pueden evitar con incineradores de lecho fluidizado, que permiten quemar de forma eficiente combustibles de bajo poder calorífico y alto contenido en cenizas, como es el caso de los residuos sólidos. En el proceso los residuos son triturados retirándose previamente los elementos metálicos, y fluidizándose el resultado en el incinerador. La temperatura alcanzada en la operación del lecho es del orden de  $800\text{-}900^\circ\text{C}$ , produciéndose la quema y descomposición de los elementos orgánicos.

El calor sobrante es evacuado del lecho mediante circulación de agua, para aprovechar la energía residual. La ceniza se elimina por la parte inferior del lecho y los sólidos se queman por completo.



*Figura 13. Incinerador en lecho fluidizado modelo Ebara. SW: residuo sólido; FG: gas residual; FR: superficie libre; FB: lecho fluidizado SA: entrada de aire secundaria; SN: arena; RE: residuos; PA: entrada principal [1]*

El tratamiento posterior de los residuos debe ser el adecuado para poder mejorar la eficiencia de estos sistemas, con el fin de eliminar los materiales inorgánicos. Por otra parte es necesario garantizar la calidad de las emisiones mediante el uso de filtros adecuados.

## 2.4.5. CARBONIZACIÓN Y GASIFICACIÓN

### 2.4.5.1. Gasificación de carbón

Como se mencionó en el primer apartado, el gasificador de carbón de Winkler fue la primera aplicación con importancia de los lechos fluidizados en el ámbito comercial. En los años 1950s la abundancia y el bajo precio del petróleo y el gas natural hizo que este tipo de gasificadores desapareciera.

La crisis del petróleo de los años 1970s produjo el retorno al uso del carbón, aumentando el número de empresas que iniciaron estudios de viabilidad y proyectos para la obtención de un sustituto del petróleo.

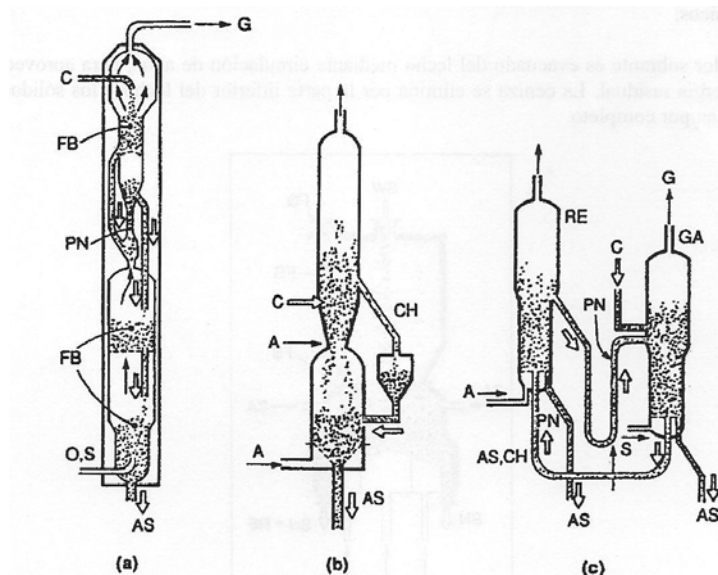


Figura 14. Gasificación del carbón con lecho fluidizado. (a) Modelo Hygas; (b) Modelo Mitsubishi; (c) Modelo Union Carbide. A: aire; AS: ceniza; C: carbón; CH: producto sólido; FB: lecho fluido; GA: gasificador; G: gas producto; PN: transportador neumático; RE: regenerador; S: vapor; W: agua [1]

En el proceso de la gasificación se quema la materia sólida, carbón en este caso, con aporte mínimo de oxígeno. Su objetivo es principalmente la eliminación de partículas y otras impurezas del combustible sólido convirtiéndose así en gas para poder ser utilizado en sistemas de combustión exigentes en lo que a la calidad del combustible se refiere. El producto sólido resultante en la gasificación (char), está formado por cenizas y residuos carbonosos.

Existen diferentes agentes para llevar a cabo el proceso de la gasificación como son el aire, oxígeno, vapor de agua, o hidrógeno, y depende de ellos el contenido energético del gas que se obtiene.

Se han realizado infinidad de diseños sobre gasificadores de carbón en lecho fluidizado, desde procesos con un solo lecho procesos de múltiples lechos, con recirculación de partículas, operando a alta presión y fluidizados con diferentes agentes gasificantes.

### 2.4.5.2. Gasificación de residuos sólidos

En ocasiones los residuos sólidos urbanos suelen contener materiales tóxicos y peligrosos. Todo esto hace que en las plantas de incineración ordinarias sea necesaria la implantación de equipos para la limpieza de los gases de escape, de acuerdo con las exigencias y normativas medioambientales vigentes. A pesar de esto, la limpieza asociada a los gases de combustión en plantas de gasificación resulta más simple y barata porque el volumen de gas producido es menor que en las incineradoras, resultando el tratamiento de residuos sólidos mucho más ventajoso.

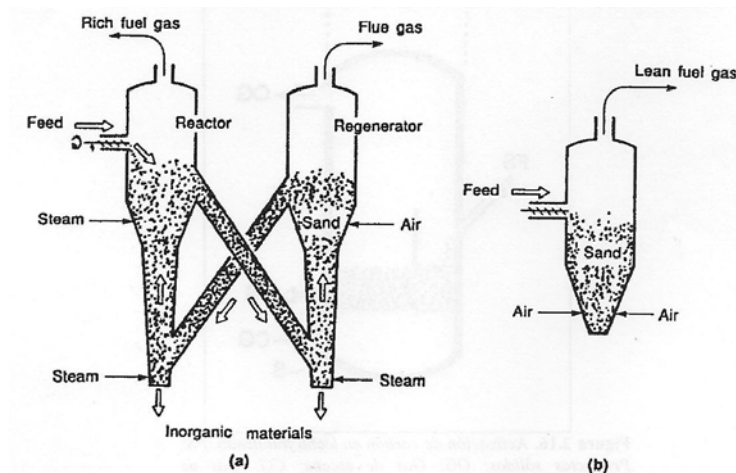


Figura 15. Gasificación de residuos sólidos con lecho fluidizado. (a) Proceso Pyrox; (b) Proceso Tsukishima [1]

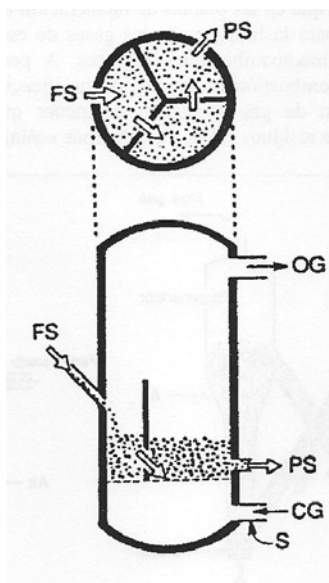
Un claro ejemplo de gasificador en lecho fluidizado es el empleado en el proceso Pyrox (figura 15 (a)). Este proceso consta de dos lechos fluidizados conectados por dos conductos en pendiente descendente.

De forma continua los residuos son triturados e introducidos en el gasificador junto con vapor para producir gas combustible enriquecido. La materia sólida sobrante es enviada al regenerador junto con la arena del lecho donde se llevará acabo su combustión. Los gases residuales se expulsan y se devuelve la arena caliente al gasificador proporcionándose la energía suficiente para la gasificación posterior.



### 2.4.5.3. Activación de carbón

Para la absorción de contaminantes en corrientes gaseosas y líquidas se emplea carbón activado, el cual sirve para la separación de sustancias orgánicas en la recuperación de solventes, y como catalizador. Para la activación del carbón a través de lecho fluidizado suele emplearse como materia prima el propio carbón, madera u otros residuos vegetales (cáscara de coco cacahuete).



*Figura 16. Activación de carbón en lecho fluidizado. PS: productos sólidos; OG: gas de escape; CG: gas de combustión; S: vapor; FS: alimentación de sólidos [1]*

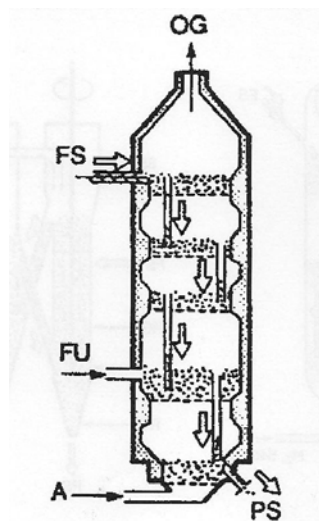
El proceso de la activación se divide en dos fases: la carbonización de los sólidos precursores y la activación o gasificación del carbonizado, que tiene lugar a una temperatura de 800-1000°C. en el proceso se eliminan elementos tales como  $H_2$  y  $O_2$  de los precursores, para obtener como resultado un esqueleto carbonoso.

En la gasificación el carbonizado se fluidiza con un agente oxidante (aire, oxígeno, vapor de agua o combinación de éstos), de manera que se eliminan los átomos de la combustión posterior del  $CO$  y  $H_2$  procedentes del proceso de la carbonización.



### 2.4.6. CALCINACIÓN

De manera sencilla se pueden calcinar partículas de caliza y dolomita en un lecho fluidizado quemando directamente combustibles en el lecho. La reacción resultante de dicho procesos es altamente endotérmica por lo que supone un elevado derroche de combustible. Para poder recuperar gran parte del calor que se ha perdido en el proceso se suelen emplear sistemas multietapa, donde el material bruto se introduce por la etapa superior y va cayendo de etapa en etapa.



*Figura 17. Calcinación de caliza en lecho fluidizado. OG: gas de escape; PS: productos sólidos; A: aire; FU: combustible; FS: alimentación de sólidos [1]*

En la calcinación se inyecta el combustible en una de las etapas inferiores, donde se mezcla con el aire fluidización quemando las partículas de material. El calor residual sirva para aumentar la temperatura de las partículas de las fases superiores, abandonando el lecho por la parte inferior los restos calcinados.

### 2.4.7. REACCIONES CON SÓLIDOS

Los lechos fluidizados son utilizados para modificar características de minerales a través de determinadas reacciones. Un buen ejemplo es la tostación para poder obtener metales a partir de sulfuros de mineral. La reacción resultante se caracteriza por ser una oxidación levemente exotérmica, con lo que se suelen emplear lechos fluidizados de una sola etapa sin evacuación de calor o con una ligera refrigeración.

Al requerir estas unidades menor exceso de aire, se obtienen gases de escape con una concentración mayor de dióxido de azufre, es por ello que lo tenemos que tener presente de cara a cumplir las exigencias medioambientales.

## ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Los lechos fluidizados también son utilizados para la producción de silicio de elevada pureza para la fabricación de semiconductores y células solares. La obtención de silicio puro a partir de silicio de grado metalúrgico, se lleva a cabo a través de diversos pasos sobre los que se han desarrollado diferentes unidades de lecho fluidizado.

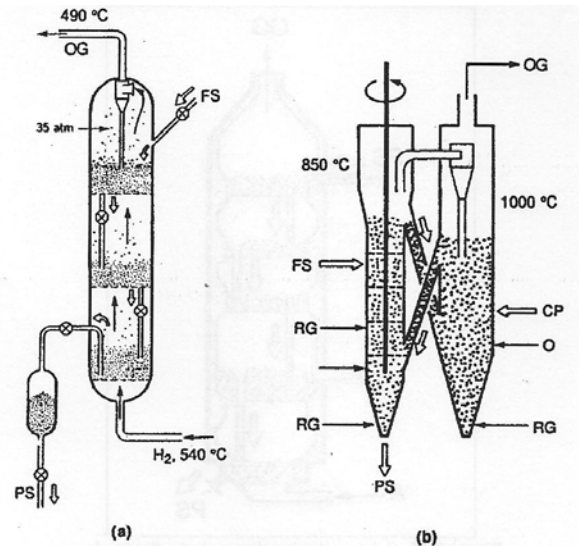
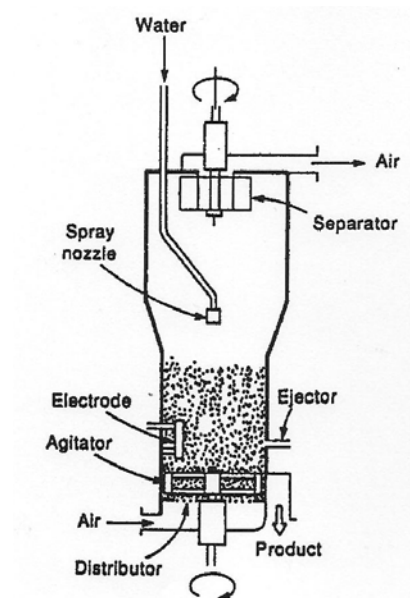


Figura 18.Reducción de óxidos de hierro. (a) Proceso H-Iron; (b) Proceso Kawasaki Iron and Steel; CP: partículas de coque; OG: salida de gas; FS: alimentación de sólidos; PS: productos sólidos; Rg: gas reducido; O: oxígeno. [1]

Otra aplicación de los lechos fluidizados es la reducción de óxidos de hierro, para producir hierro y acero a partir de partículas de mineral de alto grado. Hay varios procesos que se han desarrollado sobre esta aplicación, desde unidades de varias etapas hasta unidades donde la reducción se lleva a cabo de forma directa y con más eficiencia. La *figura 18* muestra la unidad de reducción directa, donde las partículas de mineral de hierro se introducen a 700°C en el reactor, que dispone de distribuidores rotatorios para evitar la posible aglomeración de sólidos. Además incluye partículas de coque que se recirculan entre reactor y calentador, donde el carbón se quema y gasifica con oxígeno. El gas de escape del calentador se puede tratar y usar para alimentar el reactor.

## 2.4.8. BIOFLUIDIZACIÓN

Una de las aplicaciones más peculiares de las fluidizaciones el cultivo de microorganismos. En la *figura 19* se muestra un diseño desarrollado para cultivar el hongo “*Aspergillus Sojae*”, en la producción de salsa de soja.



*Figura 19. Producción de salsa de soja. [1]*

El primer paso es tratar el trigo y pasteurizarlo con vapor sobrecalentado, fluidizándose más tarde con aire esterilizado. El lecho con agua para que se mantenga la humedad al nivel deseado y posteriormente son introducidas las semillas de microorganismos mediante un eyector.

Resulta mucho más ventajoso el cultivo de microorganismos en lechos fluidizados que el cultivo convencional por varios motivos:

- ❖ Mayor efectividad en el crecimiento de la superficie de los microorganismos.
- ❖ Fácil transferencia de oxígeno lo que activa el metabolismo.
- ❖ Eficiencia en la eliminación del calor y  $\text{CO}_2$  generado por el Metabolismo.
- ❖ Facilidad para controlar temperatura, humedad y pH.

## 3 CONCEPTOS TEÓRICOS DE FLUIDIZACIÓN

En el presente capítulo se tratará teóricamente los aspectos fundamentales que caracterizan a los lechos fluidos: la pérdida de carga a través del lecho, la velocidad mínima de fluidización y la frecuencia característica del lecho.

### 3.1. PÉRDIDA DE CARGA

El movimiento ascendente del gas a través de un lecho de partículas, experimenta una pérdida de carga por resistencia que ofrecen estas al paso del mismo. En la *figura 20* se muestra un comportamiento característico de los sistemas gas-sólido.

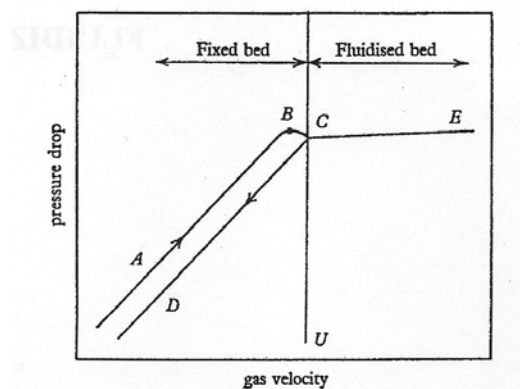


Figura 20. Curva pérdida de carga-Velocidad para sistemas gas-sólido [2]

La figura muestra la relación entre la pérdida de carga en el lecho y la velocidad superficial del gas. En el eje de abscisas se representa la velocidad del gas y en el eje de ordenadas la pérdida de carga del flujo de gas en el lecho. Si se parte desde  $U=0$ , se puede observar como a medida que se aumenta la velocidad del gas la pérdida de carga del lecho aumenta linealmente (recta A). en el punto B la pérdida de carga en el lecho es mayor que la necesaria para mantener las partículas en suspensión. Si se aumenta levemente la velocidad la presión cae hasta justo lo necesario para soportar el peso de las partículas (C). las condiciones del punto C se denominan condiciones de mínima fluidización.

Si desde C se disminuye la velocidad hasta  $U=0$  (recta D), se comprueba que existe una cierta histeresis ya que no coincide la pérdida de carga al aumentar y al disminuir la velocidad. Este es debido a que cuando se fluidiza el lecho es necesario vencer las fuerzas de atracción existentes entre las partículas mientras que si lo defluidizamos no es necesario vencer esta fuerza. El punto B es más acentuado cuanto mayor es la relación de compactación de las partículas. Se podría hacer coincidir ambas curvas si se repitiese el experimento obteniendo de nuevo la recta A pero con el lecho recientemente fluidizado.

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

---

A su vez en la gráfica también se observan dos tramos bien diferenciados:

- ❖ Lecho fijo: la pérdida de carga aumenta linealmente con la velocidad superficial del gas. La pérdida de carga se determina mediante la ecuación de Ergun.

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \frac{\mu U}{d^2} \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} + 1.75 \frac{\rho U^2}{d} \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3} \quad \text{Ec.1. Ecuación de Ergun}$$

- ❖ Lecho fluidizado: una vez que el lecho está fluidizado la pérdida de carga en el mismo se mantiene constante y es igual al peso por unidad de superficie de las partículas en suspensión del lecho:

$$\Delta P = \frac{m \cdot g}{A} \quad \text{Ec 2. Pérdida de carga en un lecho fluidizado.}$$

## 3.2. VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

El problema de determinar  $U_{mf}$  es esencialmente el problema de encontrar el flujo que produce una caída de presión en el lecho igual a su peso por unidad de sección.

La principal dificultad en la predicción de  $U_{mf}$  es conocer el valor de la fracción de vacío cuando el lecho está fluidizado. Suponiendo que el lecho está compuesto por esferas uniformes que toman el modo cúbico de paquete cuando comienza la fluidización:

$$\varepsilon_0 = \frac{6 - \pi}{6} \quad \text{Ec 3. Estimación fracción de vacío.}$$

Es una aproximación válida ya que experimentalmente se ha observado que el valor de  $\varepsilon_0$  se encuentra entre 0.4 a 0.5 en la fluidización de partículas esféricas de tamaño uniforme.

A su vez suponiendo que al iniciarse la fluidización el número de Reynolds toma valores pequeños, predomina el primer términos de la ecuación de Ergun (ec. 1). Sustituyendo el valor de fracción de vacío estimada se obtiene:

$$\frac{\Delta P}{L} = 381.88 \frac{\mu U}{d^2} \quad \text{Ec 4.}$$

Por otro lado en la fluidización incipiente la caída de presión es suficiente para soportar el peso de las partículas en una sección unidad, por tanto:

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_s - \rho)g(1 - \varepsilon_0) \text{ Ec 5.}$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad del material de las partículas. Combinado la ecuación 4 con la ecuación 5, se obtiene:

$$U_{mf} = 0.00137 \frac{(\rho_s - \rho)gd^2}{\mu} \text{ Ec 6. Pérdida de carga en un lecho fluidizado.}$$

Existen correlaciones semejantes, estas son diferentes en función de la forma de obtener el valor de la fracción de vacío  $\varepsilon_0$ , pero todas ellas siguen la deducción mostrada.

### 3.3. FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO

Partiendo de la base de que no todos los lechos son iguales (diferente dimensiones, masa de partículas o incluso las mismas partículas) todo ellos cumple que poseen un frecuencia característica propia para las fluctuaciones de presión existentes en el mismo.

## 4. BURBUJAS EN LECHOS FLUIDOS Y CARACTERIZACIÓN DE PARTÍCULAS

Cuando un lecho de sólidos es suspendido en una corriente ascendente, el lecho se puede comportar de varias maneras: se fluidiza suavemente en ausencia de burbujas, burbujeando o como un chorro. El comportamiento del lecho depende en gran parte del tipo de sólidos utilizados.

Muchas propiedades características de los lechos fluidos gas-sólido son dominadas por el comportamiento de las burbujas, por lo tanto el conocimiento del comportamiento de las mismas es de vital importancia para el desarrollo y diseño de operación en lechos fluidos.

Las fluctuaciones de presión causadas por el paso de las burbujas en el interior del lecho como medida indirecta pueden proporcionar el tamaño de las mismas y su velocidad. Además de la medida de la presión puede aportar una idea de en qué régimen de fluidización está el lecho.

### 4.1. FORMACIÓN Y CRECIMIENTO DE BURBUJAS

La formación de burbujas en el lecho es análoga a la formación de las mismas en un líquido de baja densidad. Cuando se introduce aire en un líquido a través de un orificio, se forma un tren de burbujas que desplazan el líquido y suben hacia la superficie del mismo si su densidad es inferior. Cuando llegan a la superficie estas burbujas estallan provocando fluctuaciones de presión. El ascenso de las burbujas produce una serie de fluctuaciones de presión locales debidas al paso de las mismas, su coalescencia, y el efecto pared.

Lo sucedido en un lecho de partículas es semejante, insuflamos aire a través del distribuidor formando burbujas que ascienden por el lecho provocando fluctuaciones de presión a un paso. La formación de burbujas ocurre con el lecho fluidizado y en su fluidización. A continuación se exponen una serie de semejanzas con el burbujeo en un líquido de baja viscosidad:

- ❖ La forma de las burbujas pequeñas es esférica, esférico-casquillo cuando son más grandes y aplanadas y torcidas cuando son mucho más grandes.
- ❖ Las burbujas pequeñas ascienden lentamente y las burbujas grandes ascienden rápidamente.
- ❖ Un tren de burbujas puede coalescer para formar burbujas de mayor tamaño. La interacción de las burbujas proporciona una velocidad de ascensión diferente, aunque la misma dirección.
- ❖ El efecto de las paredes actúa en la misma dirección que la velocidad de ascenso de las burbujas.
- ❖ El exceso de gas inyectado en los lechos fluidos pasa a través del lecho en forma de burbujas.

Los estudios realizados han demostrado que un lecho fluido en condiciones de mínima fluidización puede ser tratado como un líquido de baja densidad. Cuando la velocidad del gas está por encima de la mínima fluidización, el exceso de aire pasa a través del lecho en forma de burbujas que ascienden de forma similar al ascenso de burbujas de aire en un líquido de baja densidad. El valor de la fracción de vacío de la fase densa del lecho (la fase que no son burbujas), es aproximadamente igual al valor de la fracción de vacío en condiciones de mínima fluidización  $\epsilon_{mf}$ . A altas velocidades el ascenso de las burbujas produce grandes fluctuaciones y arrastre de sólidos.

## 4.2 PROPIEDADES DE LAS PARTICULAS DE FLUIDIZACIÓN

Conocido los tipos de burbujas que se pueden formar se consideran las partículas a fluidizar y como afectan estas al proceso de fluidización. Cuando las partículas son esféricas se pueden medir sencillamente y calcular sus parámetros. Pero en la realidad nunca se tendrán partículas esféricas de ahí la dificultad que presenta poder desarrollar un modelo sencillo.

A continuación se definen los principales parámetros de los sólidos:

- Densidad de las partículas,  $\rho_s$ : La densidad se define como la masa de una partícula  $m_p$  entre el volumen que ocupa la misma, o volumen que ve el fluido cuando rodea a la partícula incluyendo todas las imperfecciones y poros. Dicho volumen se denomina volumen hidrodinámico  $V_h$ :

$$\rho_s = \frac{m_p}{V_h} \text{ Ec 7.}$$

- Densidad aparente del lecho,  $\rho_b$ : Se calcula como la masa total de las partículas contenidas en el lecho entre el volumen que ocupan incluyendo el espacio entre las mismas, denominado volumen aparente  $V_{ap}$ :

$$V_{ap} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} L \text{ Ec 8.}$$

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \text{ Ec 9.}$$

- Fracción de vacío en el lecho,  $\epsilon_0$ : La fracción de vacío del lecho representa la relación de volumen entre los espacios entre las partículas y el volumen aparente del lecho:

$$\epsilon_0 = 1 - \frac{\sum V_h}{V_{ap}} \text{ Ec 10.}$$



De forma que:

$$\rho_b = (1 - \varepsilon_0) \rho_s \text{ Ec 11.}$$

Se hace necesario conocer o bien  $\varepsilon_0$  o bien  $\rho_s$  para obtener las propiedades de las partículas.

### 4.3 CLASIFICACIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE FLUIDIZACIÓN

Según el tipo de partículas utilizadas las propiedades del lecho así como su operación varían. En 1973 Geldart, clasificó las partículas en cuatro grandes grupos según sus propiedades de fluidización en condiciones ambiente. Actualmente es utilizada esta clasificación en diversos campos de tecnología de partículas.

Si se fluidizan partículas con aire en condiciones ambiente y se tiene una región del lecho con fluidización no burbujeante a velocidad mínima de fluidización, seguida de una fluidización burbujeante a medida que se incrementa la velocidad, las partículas que presentan este tipo de comportamiento se engloban en el denominado “grupo A”.

Si las partículas sólo ofrecen un comportamiento burbujeante tanto a velocidad mínima de fluidización como por encima de la misma, pertenecen al “grupo B”.

En el otro extremo se encuentra el “grupo C”, que lo componen las partículas muy finas y cohesivas que no se pueden fluidizar en el sentido más estricto; y el “grupo D”, formado por partículas grandes que producen los lechos de “chorro” al ser fluidizadas.

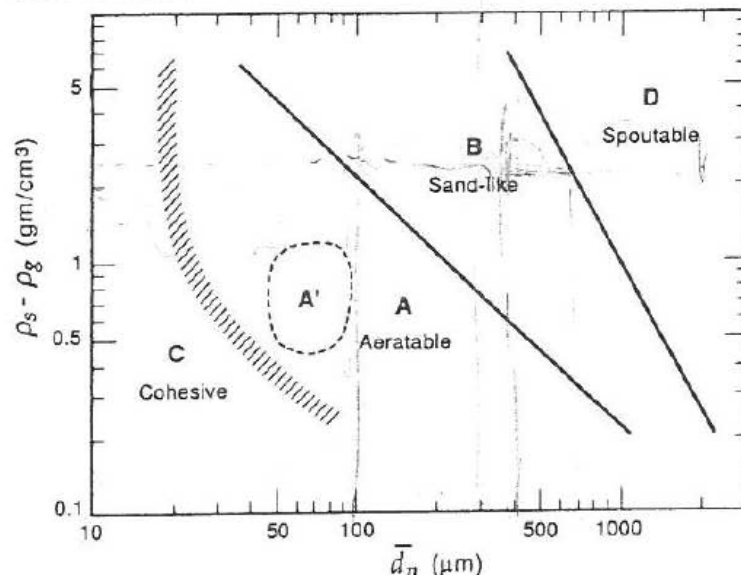


Figura 21. Clasificación de las partículas según Geldart por peso y tamaño. [1]

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

---

El estado de fluidización burbujeante es el que se encuentra comúnmente en los sistemas de uso comercial. Por lo tanto, en las aplicaciones comerciales se encuentran normalmente partículas del grupo A, puesto que el rango de velocidades del gas de fluidización en el que tiene lugar el estado no burbujeante es pequeño. La velocidad superficial del gas a la que aparecen las primeras burbujas se conoce como velocidad de mínimo burbujeo,  $U_{mb}$ .

Las propiedades de fluidización de las partículas en aire se pueden predecir si se clasifican en uno de los cuatro grupos. Se debe resaltar que condiciones de temperatura y presión superiores a la ambiental pueden suponer que un tipo de partícula en concreto muestre un comportamiento típico de un grupo diferente al que realmente pertenece.

También se pueden clasificar las partículas según su  $U_{mb}$  respecto a su  $U_{mf}$  ya que en ciertas aplicaciones es necesario conocer el comportamiento frente al burbujeo de las partículas:

- En las partículas del grupo A, donde  $U_{mb} > U_{mf}$ , las burbujas se dividen y coalescen continuamente existiendo un máximo tamaño de burbuja. Esto hace que la fluidización sea suave y de buena calidad.
- En las partículas de los grupos B y D, con  $U_{mb} = U_{mf}$ , las burbujas crecen de manera continua sin existir un límite en cuanto al tamaño máximo alcanzado. Con lo cual, la fluidización es de peor calidad y llevando asociada grandes fluctuaciones de presión.
- En el grupo C, las fuerzas entre las partículas son mayores comparadas con las fuerzas de inercia. Así, las partículas no son capaces de alcanzar la separación necesaria para ser totalmente soportadas, no consiguiendo la fluidización. No aparecen burbujas sino que se forman canales de gas a través del lecho de partículas. Sin embargo, la fluidización se puede conseguir con la ayuda de agitadores mecánicos o mediante vibración.

Cuando el tamaño de las burbujas es aproximadamente 0.6 veces el diámetro del lecho, se puede decir que se produce la formación de *slugs* de gas. Se debe evitar el *Slugging* ya que aparecen grandes fluctuaciones de presión que producen muchas vibraciones en la instalación. Este efecto no ocurre si la velocidad superficial del gas es relativamente moderada y el tamaño del lecho es relativamente grande comparado con el tamaño de las burbujas.

En la tabla 2 se resume la clasificación de Geldart, de acuerdo con diversas características de las partículas y otros aspectos relativos a su fluidización.

## ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización. Muestran un rango de no burbujeo.	Comienzo del burbujeo a $U_{mf}$	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Sólidos bastos
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina, cemento	Grava, granos de café.
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de desaireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, posteriormente exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	No hay burbujas, sólo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Sólo en lechos poco profundos	No	Sí, incluso en lechos profundos

*Tabla 2. Clasificación de Geldart atendiendo al comportamiento de las partículas.*

## 5.MÉTODOS DE ANÁLISIS DE SEÑAL

Las series temporales de presión son una superposición de fluctuaciones locales causadas por el movimiento de las burbujas a lo largo de lecho y por lo tanto por la turbulencia del gas. Las ondas de presión viajan a lo largo del lecho de ambas direcciones desde su punto de origen. Su amplitud decae linealmente con la distancia de su origen a la superficie del lecho pero no en sentido contrario. Por lo tanto estas fluctuaciones de presión pueden ser medidas en el plenum del lecho. Al contrario que estas fluctuaciones, las burbujas generan sólo fluctuaciones locales de presión que no pueden ser detectadas en el plenum.

### 5.1 VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN UTILIZANDO LA MEDIDA DE FLUCTUACIONES DE PRESION

Es posible obtener la velocidad mínima de fluidización experimentalmente sin interrumpir el proceso usando la desviación típica de las fluctuaciones de presión.

En 1974 Verloop [10] y Herejes fueron los primeros en utilizar el estudio de las fluctuaciones de presión en lechos burbujeantes. En 1985 Puncochar obtuvo la manera de hallar la velocidad mínima de fluidización ( $U_{mf}$ ), en condiciones de operación, a través de la medida de las fluctuaciones de presión. A su vez no se hace necesario conocer las características de las partículas del lecho.

Analizando las fluctuaciones de presión producidas en el lecho, se observó que la desviación típica de las mismas era función casi lineal de la velocidad superficial del gas (Puncochar 1985) [9]:

$$\sigma_p = A + BU \quad \text{Ec 12.}$$

Siendo  $U$  la velocidad superficial del gas,  $B$  la pendiente de la recta, y  $A$  una constante.

Las fluctuaciones de presión en el lecho son producidas por varios fenómenos como la creación de burbujas, el ascenso de las mismas por el lecho, y su erupción cuando llegan a la superficie. Por lo tanto, para partículas de los grupos B y D de la clasificación de Geldart en las que la velocidad mínima de fluidización coincide con la velocidad mínima de burbujeo es posible determinar la velocidad mínima de fluidización como la velocidad del gas a la cual la desviación típica de las fluctuaciones de presión es mayor de cero, es decir, a la velocidad que empiezan la aparición de las burbujas y por tanto de las fluctuaciones de presión.

De este modo se obtendrá  $U_{mf}$  cuando las sea :

$$U_{mf} = -\frac{A}{B} \quad \text{Ec 13.}$$

## ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Desde que Puncochar obtuvo la velocidad mínima de fluidización usando un lecho fluido circular con un distribuidor con orificios, muchos otros investigadores han validado el método utilizado en diferentes configuraciones de lechos. Una vez validado el método, los esfuerzos se han centrado en dos aspectos diferentes:

- Determinar el número mínimo de medidas de presión requeridas para obtener los valores aceptables de desviación estándar.

- Validez de la toma de medidas de presión en el plenum para evitar problemas físicos como la obstrucción de las sondas o la erosión de las mismas.

La base para determinar el tamaño de la muestra no se encuentra reflejada en ningún estudio. Los investigadores han trabajado con diferentes tamaños de muestra sobre lechos con semejantes condiciones de funcionamiento obteniendo un tamaño mínimo de la muestra para poder validar los resultados del ensayo.

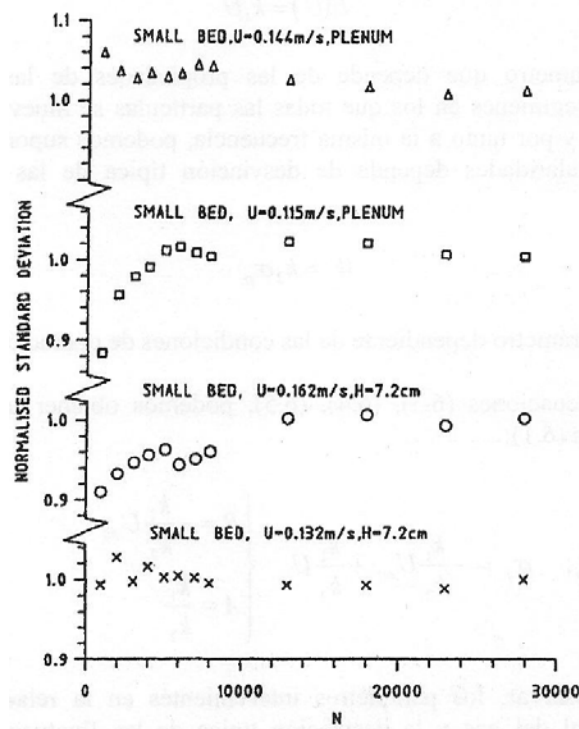


Figura 22. Desviación típica de las fluctuaciones de presión en función del número de medidas[3].

En la figura 22 (Wilkinson, 1995) [3], se muestra el efecto del aumento del número de medidas en la desviación estándar para dos localizaciones diferentes. En la figura se puede apreciar que hasta 1000 medidas el resultado puede variar significativamente con respecto al valor obtenido con series mayores. Para muestras de más de 10000 medidas, la variación entre las medidas es aproximadamente  $\pm 2\%$ . Por lo tanto, según los diferentes experimentos realizados

al respecto, debemos tomar un mínimo de 10000 medidas para aplicar este método con garantías.

Los experimentos realizados sobre la determinación del punto de medida de las fluctuaciones han validado la toma de medida de las fluctuaciones de presión en el plenum. En la figura se muestran los resultados obtenidos para diferentes puntos de medida en el lecho. Como se puede apreciar en la figura, la medida de presión en el plenum ofrece resultados semejantes que en puntos situados en el lecho. Tomando medidas en el plenum se evitarán problemas de desgaste y obstrucción, lo cual ofrece una gran ventaja.

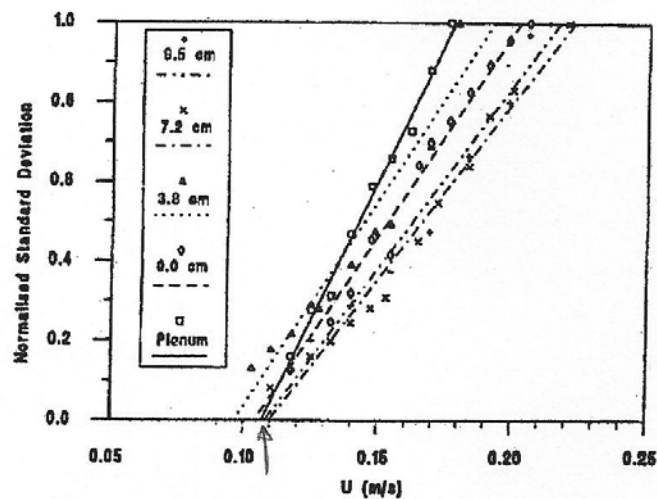


Figura 23. Desviación típica de las fluctuaciones de presión en función de la velocidad del aire introducido y la altura de muestreo[3].

### 5.2. FRECUENCIA CARACTERÍSTICA DEL LECHO UTILIZANDO LA MEDIDA DE FLUCTUACIONES DE PRESION

En el año 2.000 Hiroyuki Kage [8], realizó estudio experimentales para obtener un proceso adecuado para la obtención de la frecuencia característica de un lecho fluidizado, para cualquier tipo de lecho de partículas, en base a las fluctuaciones de presión del plenum.

El estudio demostró que las fluctuaciones de presión se ven afectadas por el tamaño de partículas, la masa de partículas y del tamaño del lecho. El uso FFT en los análisis de fluctuaciones de presión son útiles para identificar el estado de la fluidización, pero estos sistemas poseen límites que se deben tener en cuenta, sobre todo con las partículas del tipo A.

Los resultados obtenidos demuestran que las partículas tipo A y B poseen 3 frecuencias principales, las cuales se corresponden con: generación de burbujas, erupción de burbujas y frecuencia natural del lecho. En el caso del grupo B son más notorios y claros los picos de la señal para cada una de estas frecuencias, estos hechos se muestran en la gráfica 23.

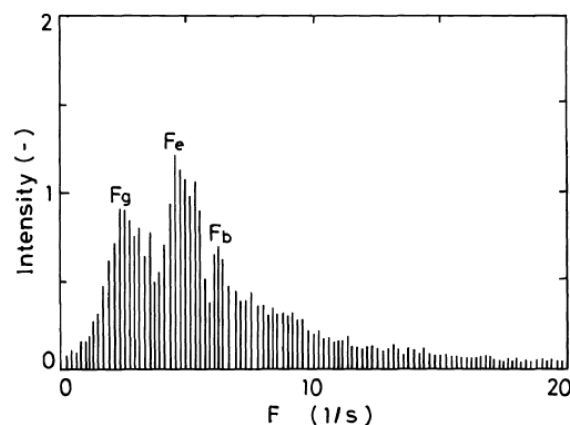


Figura 24. Frecuencias obtenidas partículas tipo A [8]

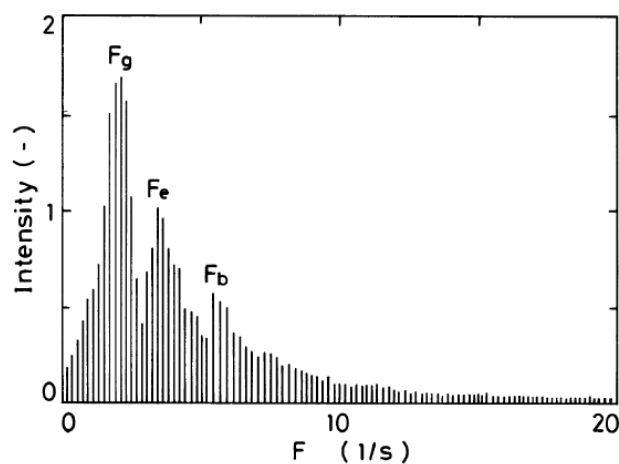


Figura 25. Frecuencias obtenidas para partículas tipo B [8]

Por el contrario como se muestra en la gráfica 26 los lechos fluidizados que contienen partículas del tipo D no se puede apreciar la frecuencia natural del lecho, pero se confirma que las frecuencias de erupción y generación están sincronizadas.

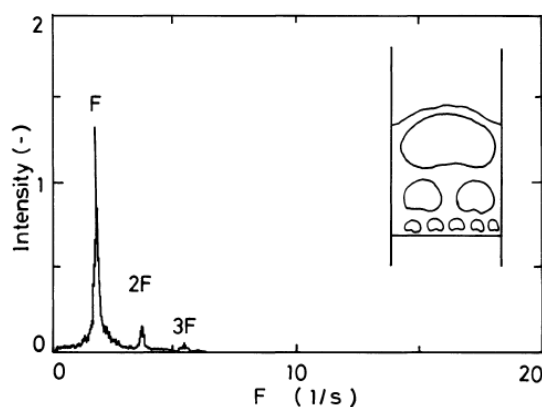


Figura 26. Frecuencias obtenidas con partículas del tipo D [8]

La frecuencia natural del lecho se puede predecir de forma teórica según la ecuación de Moritomi:

$$F_n = (P \cdot A / \rho \cdot L_{mf} \cdot V)^{1/2} / 2\pi \quad \text{Ec 14.}$$



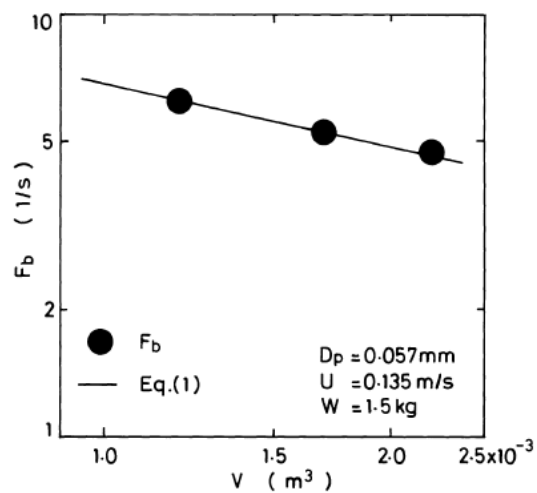


Figura 27. Comparación frecuencia experimental y teórica para el grupo de partículas A[8]

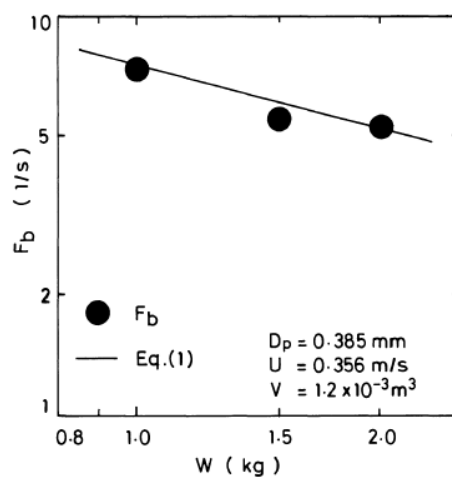


Figura 28. Comparación frecuencia experimental y teórica para el grupo de partículas B [8]

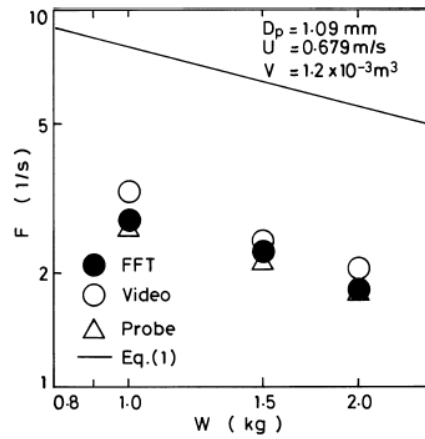


Figura 29. Comparación frecuencia experimental y teórica para el grupo de partículas  $D[8]$

## 6. EQUIPO Y TOMA DE DATOS

### 6.1 EQUIPO PARA LA TOMA DE DATOS

Unida para la medida de presión por medio de piezoeléctricos: *KISTLER Type 5015*

Las tomas de presión se sitúan en el plenum, a la altura del lecho denominada H y a la mitad del lecho llamada H/2.

Programa de adquisición de datos desarrollado por la universidad.

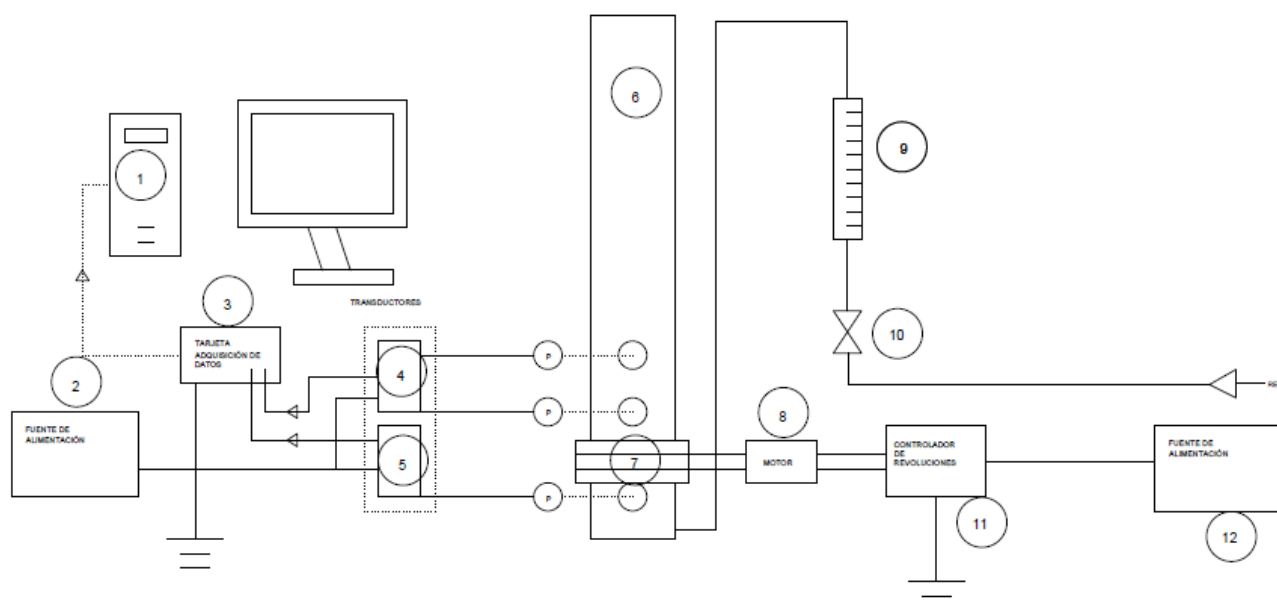


Figura 30. Esquema de la instalación- 1. PC almacenamiento y tratamiento de datos 2 Fuente de alimentación. 3 Tarjeta de adquisición de datos. 4 transductor medida de presión diferencial. 5 Transductor medida presión manométrica. 6 Columna. 7 Distribuidor. 8 Motor. 9 Rotámetro. 10 Válvula reguladora de caudal. 11 Controlador de revoluciones. 12. Fuente de alimentación.

## 6.2 TOMA DE DATOS

Los ensayos que se realizan serán para una masa de arena constante que cumpla con los siguientes parámetros ligados a las características del equipo y a las propiedades de las partículas.

$$D = 19,5cm$$

$$h/D = 0,75$$

$$\varepsilon_0 = 0,44$$

$$\rho_s = 2651g/l$$

Conocidos las propiedades de las partículas y las dimensiones del equipo se obtiene la masa de partículas necesaria para el estudio:

$$h = 0,75 \cdot 19,5cm = 14,625cm \Rightarrow V_{ap} = h \cdot \Pi \cdot \frac{D^2}{4} = 4,3677l \Rightarrow m_b = 6398,6g$$

$$\rho_b = (1 - \varepsilon_0) \cdot \rho_s \Rightarrow \rho_b = 1465g/l$$

### 6.2.1. VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN

Para llevar a término los diferentes ensayos para la realización del presente proyecto es necesario conocer la velocidad mínima de fluidización del lecho tanto en estático como con el plato distribuidor girando. Esta velocidad se obtendrá por medio de la desviación estándar que se obtiene al estudiar el lecho durante un período de tiempo y para los diferentes caudales de aire.

Así la toma de datos se realiza obteniéndose los valores de presión relativa en las diferentes alturas del lecho, a una frecuencia de 2.000 Hz, durante un período de 4 minutos para cada uno de los caudales seleccionados. Para evitar datos anómalos la toma de datos se realiza transcurrido 30 segundos desde la inyección del aire al lecho. A su vez para aquellos caudales en los cuales el lecho no estuviese fluidizado y con el giro en marcha el tiempo de obtención de datos se reduce a 1 minuto para evitar la rotura del eje que proporciona el giro.

Una vez obtenida la velocidad mínima de fluidización para cada uno de los estados del plato distribuidor, se obtendrá el caudal de aire para el cual se trabajará a lo largo del presente proyecto. Obtenidos dichos caudales se emplearán los datos obtenidos anteriormente para estimar la frecuencia característica del lecho.

## 6.2.2. TAMAÑO DE VENTANA

Obtenido el caudal de trabajo, se obtiene el tamaño de ventana. Este tamaño de ventana indica el número mínimo de datos que se deben tomar para realizar los cálculos, de forma que los resultados obtenidos sean fiables y válidos para su estudio.

Para este cálculo se obtienen los datos de presión a lo largo de 10 minutos para el caudal de trabajo calculado con giro y sin giro del plato distribuidor.

## 6.2.3. HUMEDAD Y PRESIÓN

Obtenidos ya el caudal de trabajo y el tamaño mínimo de ventana se procede a la toma de datos para el estudio en cuestión del proyecto.

La toma de datos se realiza de forma inicial con el lecho completamente seco, pasados 30 segundos con el lecho fluidizado se introduce 150 ml de agua al lecho. Esta inyección de agua se realiza desde lo alto del lecho a diferentes a lo largo del radio del lecho, así pues existen 2 posiciones desde la que se introduce el agua al lecho. La primera de ellas a 5 cm de la pared y la segunda de ellas a 15 cm (estando esta última casi en el centro del lecho). La inyección de agua se realiza de forma progresiva por medio de un embudo.

Precio a la inyección del agua y en todos y cada uno de los ensayos se realiza una toma de datos precisa de 1 minuto de forma que se pueda caracterizar el lecho.

Los datos que se obtienen son los datos relativos a las presiones relativas y a la humedad relativa del aire a la salida del lecho. Los datos de humedad se obtienen con un intervalo de 1 segundo, de forma que se asegura que se recogen todos los cambios producidos en la misma sin la existencia de grandes variaciones.

Por otro lado la medida de presión se realiza a una frecuencia de 10.000 Hz de forma que se asegura recoger cualquier fluctuación existente y obteniéndose mayor fiabilidad en los datos obtenidos en los futuros cálculos.

Para observar cómo afecta el giro en el plato de distribución para la recuperación del lecho se realizan los experimentos con la activación del giro pasado 1 minuto desde la inyección de agua y pasado 5 minutos.

La toma de datos concluye cuando la humedad del lecho vuelve a ser la humedad existente al inicio del experimento.

## 7. CÁLCULOS Y RESULTADOS

Previo a los cálculos los datos son tratados de forma que cumplan las condiciones mínimas necesarias halladas en estudios previos, estas condiciones verifican que los prescos de cálculo se adecuan a las caracterización de lechos fluidizados.

En primer lugar los datos tomados son medidas de presión diferencial entre cada uno de los sensores. Estos nuestros se toman en un espacio temporal correspondiente a 2000Hz. Según la medida óptima para los cálculos basta con una frecuencia de 400 Hz [11] por tanto se practicara un “resample” para convertir la señal tomada a dicha frecuencia, reduciéndose los datos adquiridos y relajando los procesos de cálculo posteriores.

Realizada esta primera transformación se convierte la señal recibida en voltios a una señal de presión, según los traductores este cambio de mV a Pascales se obtiene multiplicando por un factor de 1 a 1000.

Realizados estos cambios en los datos se puede proceder al cálculo de la velocidad mínima de fluidización, frecuencia característica del lecho y tiempos de secado.

Para el caso de la obtención de la frecuencia característica del lecho se hace uso de la Potencia de Welch. Consiste en un proceso matemático por el cuál se puede obtener el dato de presión más repetido a lo largo de todo el proceso de de medición y la frecuencia con que este dato aparece. Esta presión será la presión normal que posea el lecho y por tanto su frecuencia será la frecuencia característica del lecho.

Por último el tratamiento de los datos para la obtención del tiempo de secado se realiza por medio de la repetición del cálculo de la Potencia de Welch para un tamaño de datos característico. Este tamaño de datos es representativo del lecho en su totalidad.

## 7.1 VELOCIDAD MÍNIMA DE FLUIDIZACIÓN Y FRECUENCIA CARACTERÍSTICA

Para la obtención de la velocidad de mínima fluidización del lecho se realiza por medio de la desviación característica asociada a cada uno de los caudales. Según lo visto en el capítulo 5 realizando una regresión lineal enfrentando la desviación estándar con cada caudal y observando el punto de corte de la recta con el eje coordenadas se obtiene la velocidad mínima de fluidización del lecho. Este proceso se realiza por separado para los ensayos con el distribuidor de aire con giro y en estático.

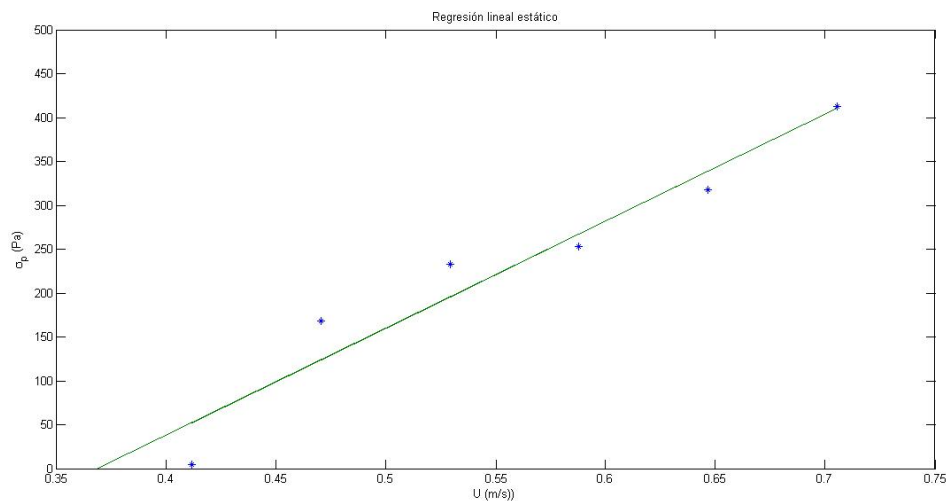


Figura 31. Regresión línea del lecho en estático.

Velocidad de mínima fluidización para el distribuidor estático es de 0,3685 m/s es decir un caudal de 610 l/min.

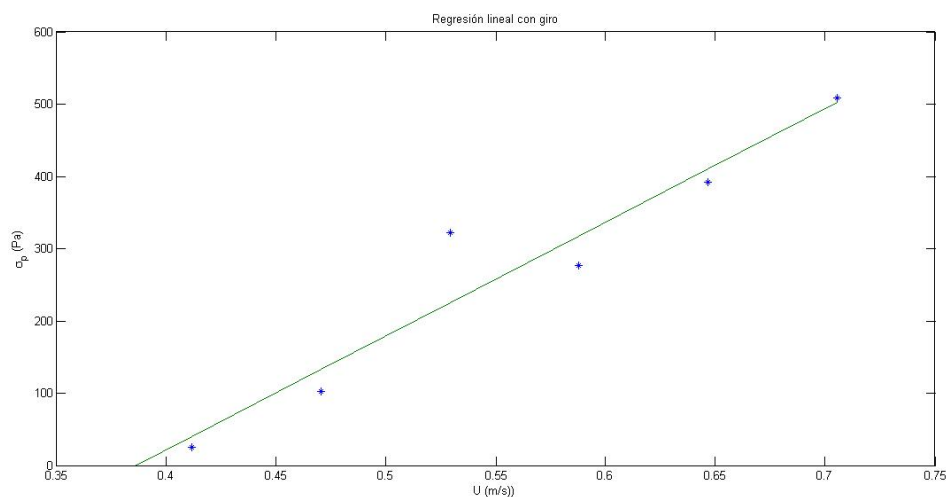
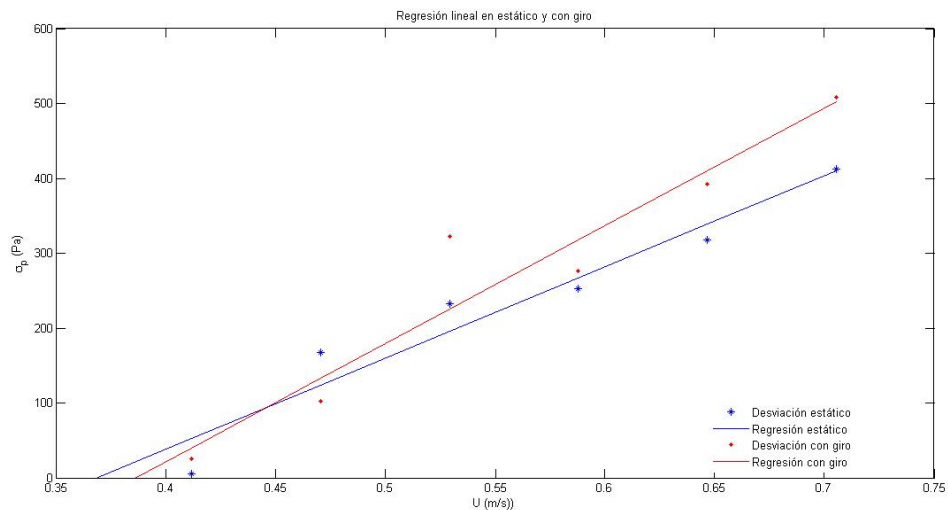


Figura 32. Regresión línea del lecho con giro del distribuidor.

Velocidad de mínima fluidización para el distribuidor con giro es de 0,3859 m/s es decir un caudal de 626 l/min.



*Figura 33. Regresión línea del lecho conjunta.*

Un vez determinada la velocidad mínima de fluidización se determina el caudal para el cual se van a realizar el resto de ensayos. Para obtener dicho caudal y asegurarse una fluidización plena a lo largo de todo el lecho se determina que el valor óptimo para la fluidización es aquel que es 1.6 veces el de mínima fluidización. Esto implica que el caudal para los futuros ensayos es de 1000 l/min. Determinado el caudal de mínima fluidización se pasa a tratar sus datos correspondientes obtenidos y la frecuencia característica para cada uno de los lechos (estático y con giro del distribuidor).

Para la obtención de la frecuencia característica se calcula la potencia de Welch de los mismos y se adimensionaliza con el máximo valor. Representando los resultados adquiridos se obtiene la gráfica siguiente:



# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

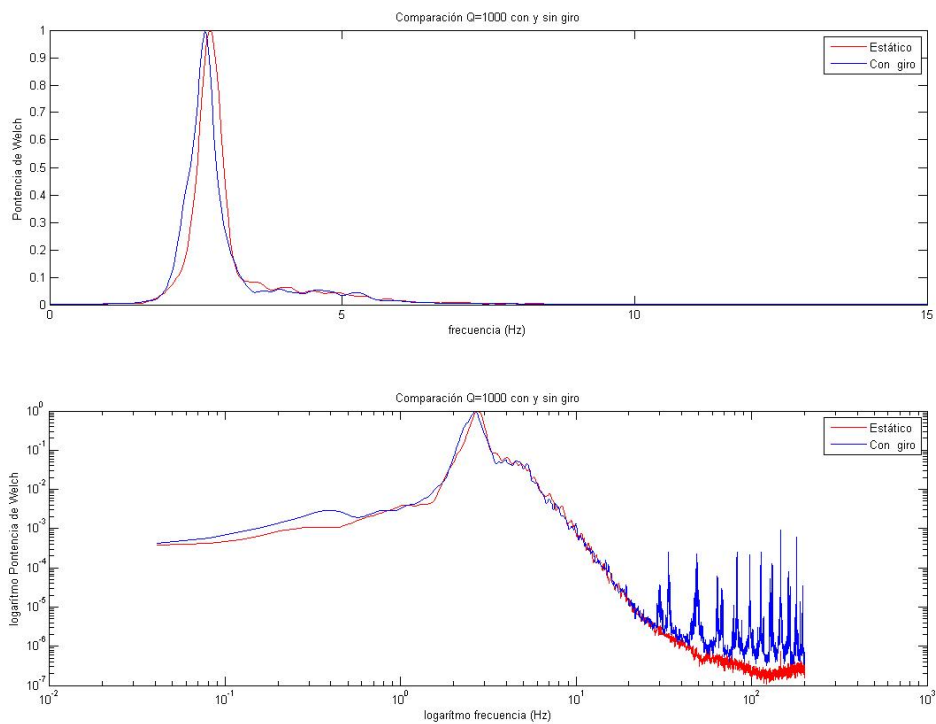


Figura 34. Frecuencia característica del lecho con caudal de aire de 1000 l/min.

La forma de estas gráficas nos indica el tipo de fluidización que tenemos y el tipo de partículas fluidizadas. Se aprecia en ambas gráficas que la frecuencia característica para ambos lechos se encuentra próxima a los 3 Hz.

## 7.2 TAMAÑO MÍNIMO DE VENTANA

Como ya se ha comentado con anterioridad, el tamaño mínimo de ventana es aquel subconjunto de los datos, tomados de forma consecutiva, que asegura que tal subconjunto caracteriza el proceso al completo estudiado. Esto será de gran utilidad para los cálculos, ya que en lugar de analizar todos y cada uno de los datos adquiridos, se trabajará con tales subconjuntos de forma que se reduce el tiempo de procesamiento sin perder fiabilidad en los resultados.

Para obtener este tamaño se toman los datos, siempre desde el inicial, en grupos de un tamaño determinado, el tamaño se irá viendo incrementado de forma constante hasta llegar al último de los datos obtenidos. Para este proyecto, debido a la gran cantidad de datos tomados y los recursos de procesamiento de los mismos al alcance, se opta por una toma de 100 datos iniciales y el mismo incremento. Si este valor fuese menor el proceso sería demasiado largo en su análisis llegando incluso a detenerse por falta de memoria. En cada grupo se calcula la desviación estándar correspondiente y es representado frente al tamaño de aquel. El tamaño de ventana será aquel cuya desviación estándar sea la desviación estándar del proceso al completo con error del 5%.

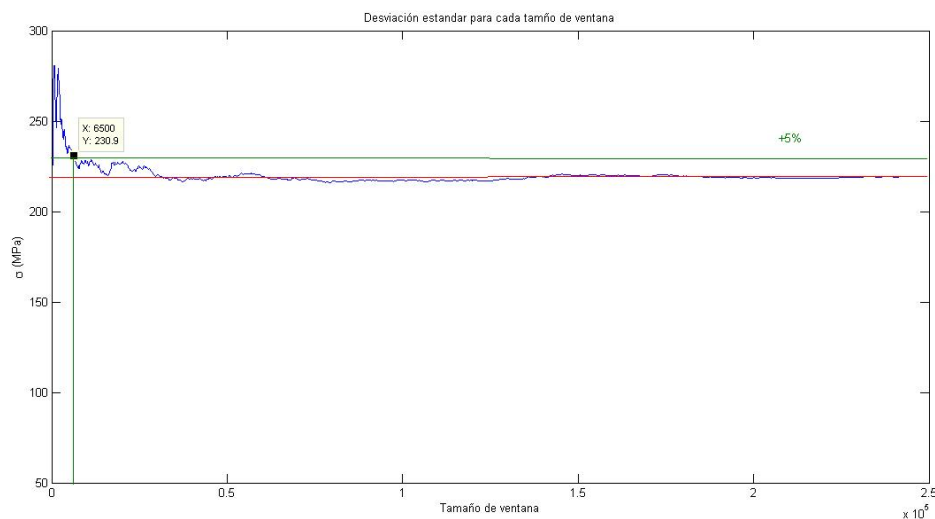


Figura 35. Tamaño mínimo de ventana.

Como se puede apreciar en la gráfica (figura 35) el tamaño de ventana característico para el lecho será de 6.500 datos, es decir un período de 16, 25 segundos de muestro. Siendo la desviación característica del proceso de 220 MPa, para tal cantidad de datos se obtiene una desviación estándar de 230,9 MPa, siendo esta ligeramente inferior al error asumible del 5%, correspondiente a 231 MPa. Este tamaño de ventana será el empleado para los cálculos futuros.

## 7.3 TIEMPO DE SECADO

Para estimar el tiempo de secado del lecho para cada uno de los ensayos realizados se obtendrá de 3 modos diferentes.

1. Cuando la humedad relativa del aire sea la inicial. Esta medida de tiempo será la real y corresponderá con el tiempo de secado verídico.
2. Se podrá estimar el tiempo de secado cuando la desviación estándar del lecho sea la desviación estándar característica de ese mismo lecho.
3. El tiempo de secado será el transcurrido desde la inyección del agua al lecho hasta que este alcance su frecuencia característica y está se prolongue en el tiempo.

A continuación se muestran las gráficas obtenidas, para cada uno de los ensayos, agrupadas en gráficas temperatura y humedad, desviación estándar y peridiogramas.

### Ensayo de lecho estático con inyección de agua desde el agujero 1:

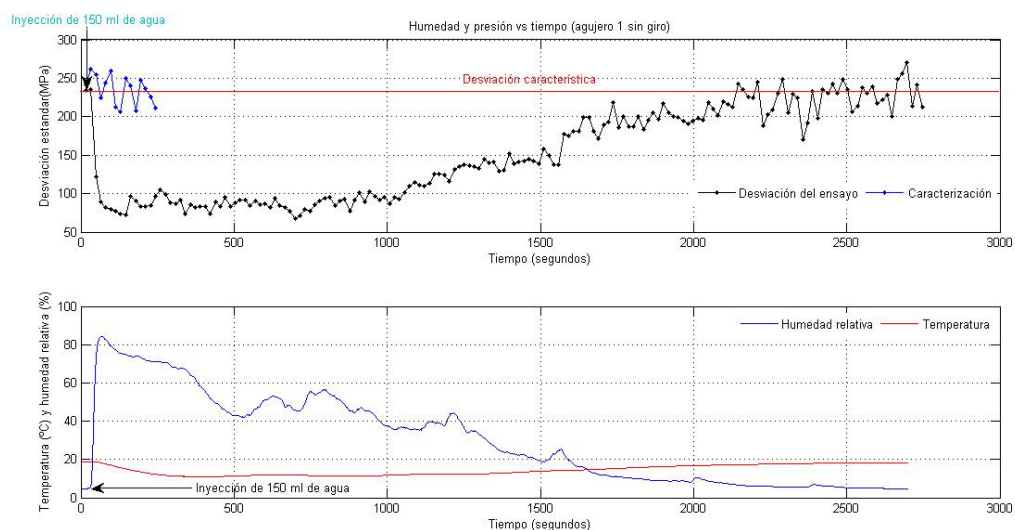


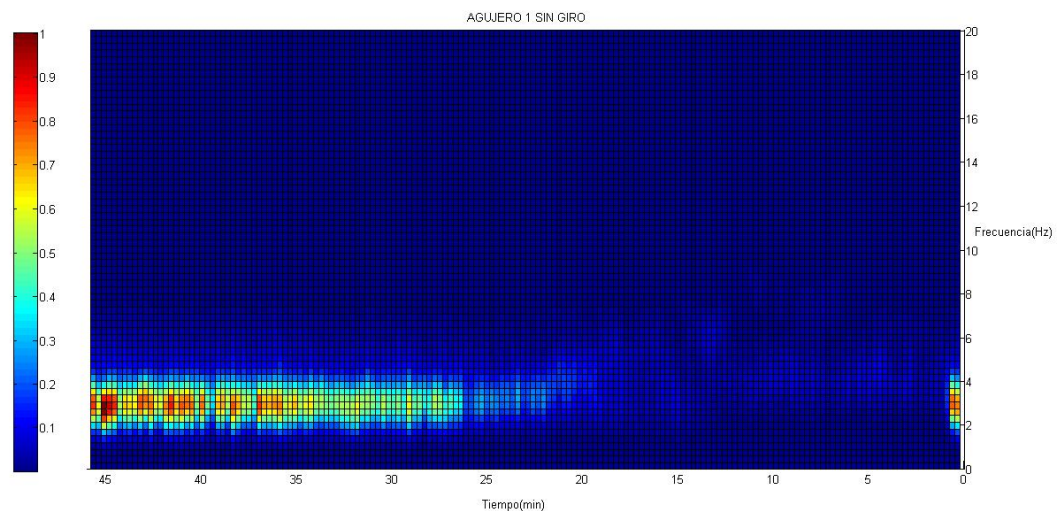
Figura 36. Variación de la humedad y la desviación estándar con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero 1 y sin giro del distribuidor.

En este primer caso se observa que el tiempo de secado según la humedad relativa, es decir, cuando se alcanza su valor inicial y este es prolongado en el tiempo es transcurrido 2500 segundos, o lo que es lo mismo 42 minutos, coincidiendo con el momento en que la temperatura se recupera. Como se observa la temperatura desciende durante el proceso de secado, debido a la energía consumida para la evaporación del agua existente en el lecho.

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Ahora bien tomando como referencia la desviación estándar característica del lecho, indicaría que este vuelve a su estado inicial, y por tanto se encuentra seco, transcurrido un periodo de tiempo de 2200 segundos aproximadamente (37 minutos), lo cual implica un error respecto a la anterior medida del 12 %.

En la presente gráfica se muestra el periodiograma del proceso, representándose en el eje de la derecha la frecuencia del lecho, en el eje horizontal el tiempo transcurrido en el secado y la variación de colores es la relación existente entre la potencia de Welch para cada ventana y la máxima obtenida en el proceso.



*Figura 37. Variación de la frecuencia característica con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero 1 y sin giro del distribuidor.*

Como se puede observar al comienzo del ensayo se obtiene un valor máximo para la relación de potencia de Welch a la frecuencia de 3 Hz, período de tiempo que se corresponde con el de caracterización del lecho. Pasado ese tiempo y añadido el agua esta relación de potencias disminuye y se distribuye a lo largo de un mayor rango de frecuencias, sin llegar a resultar ninguna de ellas representativa del lecho. Para ese período de tiempo el lecho no se encuentra fluidizado y si compacto debido al agua añadida. Transcurridos 20 minutos comienza a secarse el lecho y a fluidizarse de nuevo, aparecen mayores relaciones de potencia de Welch en la frecuencia característica del lecho, obteniéndose un máximo valor a los 36 minutos y prolongándose en el tiempo a los 41 minutos, momento para el cual el lecho estaría completamente fluidizado y por tanto seco. Obteniéndose un error en la medida de secado próxima al 2,3 %.

## Ensayo de lecho con recuperación de giro con inyección de agua desde el agujero 1:

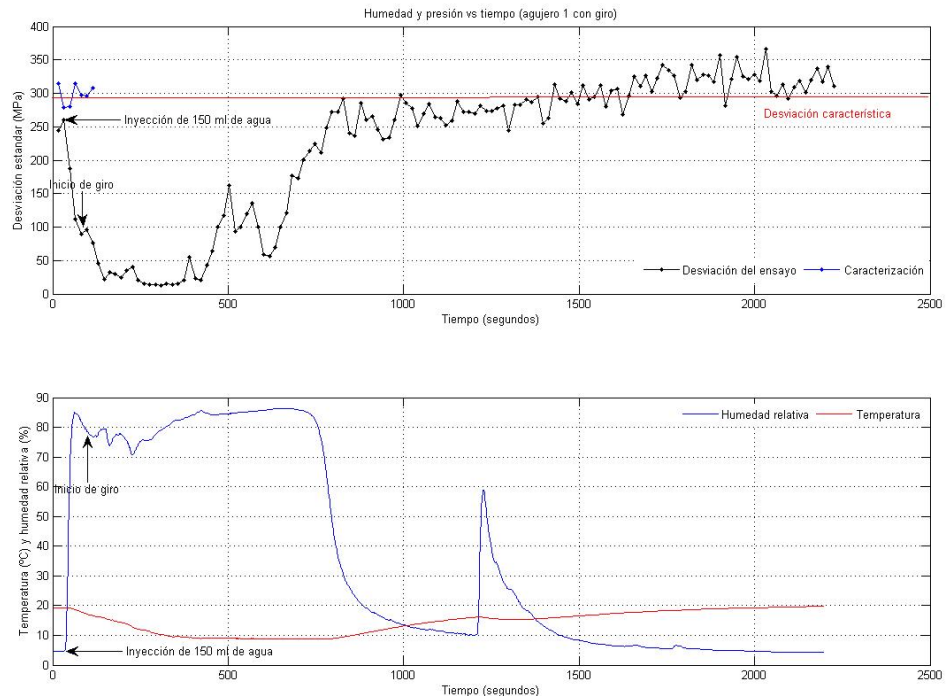
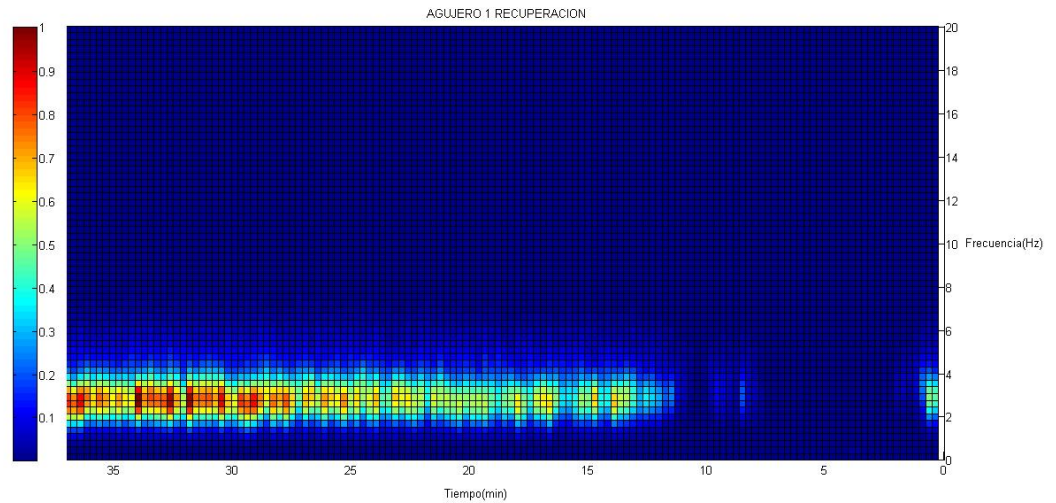


Figura 38. Variación de la humedad y la desviación estándar con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero 1 y con giro del distribuidor.

Para este segundo ensayo se inicia el giro del distribuidor transcurrido 1 minuto desde la inyección de agua. Observando cuando se alcanza la humedad inicial se obtiene para estas condiciones un tiempo de secado de 1800 segundos, aproximadamente 30 minutos, lo que implica un 28 % antes que el mismo ensayo sin activar el giro. A su vez se puede observar como al iniciar el giro la humedad asciende y se mantiene a elevados valores de humedad relativa. Para posteriormente iniciar un descenso brusco. Esto se debe a que el giro redistribuye la humedad en todo el lecho y el secado se produce de forma más uniforme. El pico que se produce a los 1200 segundos se debe a un aglomerado en la pared, que se rompe y libera el agua que contiene, aumentándose nuevamente la humedad.

Prestando atención a la gráfica de desviación estándar se llegaría a la conclusión que el tiempo de secado sería próximo a los 1400 segundos, 23 minutos, lo que implica un diferencia en el tiempo de secado respecto a la real del 22,3%. Y si se tomasen los primeros valores que se encuentran próximos a la desviación característica del lecho, el tiempo de secado sería de 1000 segundos, y no se tendría en cuenta el pico de humedad posterior y por tanto el hecho de que existan aún aglomerados en el lecho.



*Figura 39. Variación de la frecuencia característica con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero 1 y con giro del distribuidor.*

Calculando la frecuencia característica del lecho a lo largo del tiempo, se obtiene que está es de 3 Hz, frecuencia que desaparece al inyectar el agua. Esta frecuencia comienza a aparecer a los 13 minutos, coincidiendo con el descenso de humedad visto en la gráfica (figura 39) la potencia de Welch se hace máxima y constante en el tiempo, para dicha frecuencia, a los 30 minutos, lo cual coincide con el tiempo obtenido en la medida de humedad realtiva.



## Ensayo de lecho estático con inyección de agua desde el agujero central:

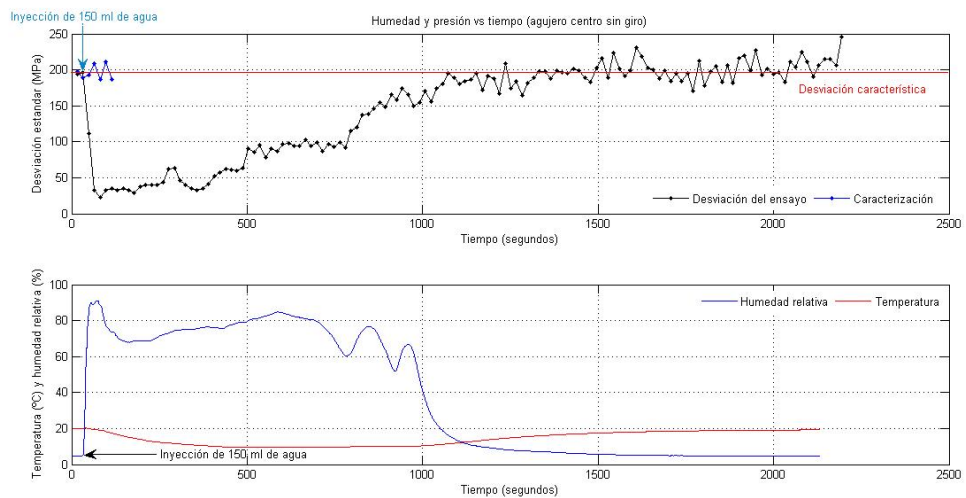
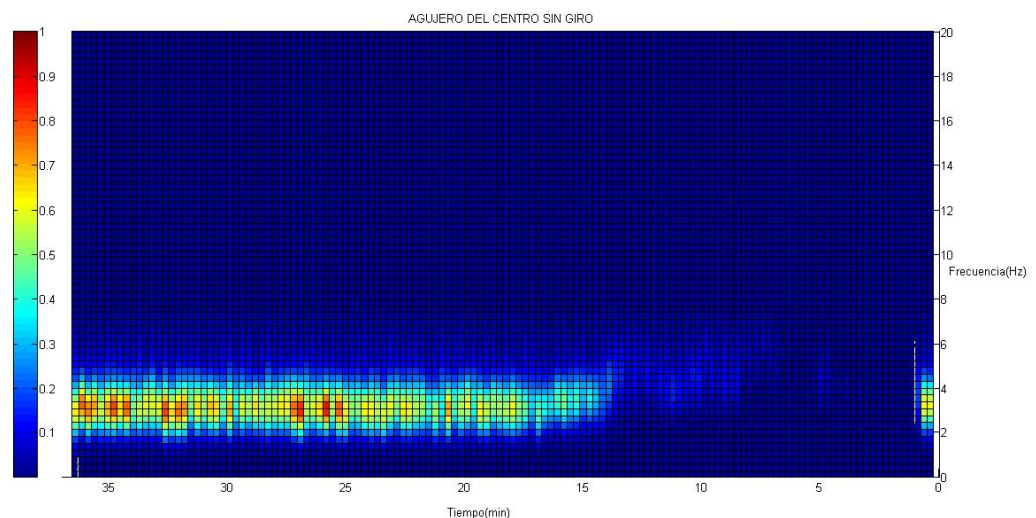


Figura 40. Variación de la humedad y la desviación estándar con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero del centro y sin giro del distribuidor.

Para este ensayo la inyección de agua se realiza desde un agujero centrado respecto al lecho. La gráfica de humedad de muestra que existe una humedad distribuida de forma pareja a lo largo y ancho del lecho, apareciendo pequeños picos indicativos de la ruptura de pequeños aglomerados. Comenzando el descenso de humedad a los 1000 segundos, coincidiendo con el aumento de temperatura. La humedad inicial se alcanza transcurridos 1600 segundos, 27 minutos, siendo también la temperatura la existente al iniciar el ensayo.

Por otro lado según la gráfica para la desviación estándar, cuando se alcanzan valores próximos a los característicos y estos se perpetúan, sería próxima a los 1200 segundos, 20 minutos, lo cuál implica un error respecto al tiempo de secado real del 25 %.



# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Figura 41. Variación de la frecuencia característica con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero del centro y sin giro del distribuidor.

Observando la potencia de Welch obtenida a lo largo de este ensayo, se aprecia que no existe una frecuencia característica clara y esta se encuentra oscilando entre valores próximos a 3 Hz, por tanto se determinará que el tiempo de secado será aquel para el cuál la potencia de Welch máxima sea próxima a mencionada frecuencia. Bajo estas condiciones se determina que el tiempo de secado según la frecuencia característica sería de 26 minutos, lo que implica un error de respecto a la real del 3,7%.

**Ensayo de lecho con recuperación con giro, inyección de agua desde el agujero central:**

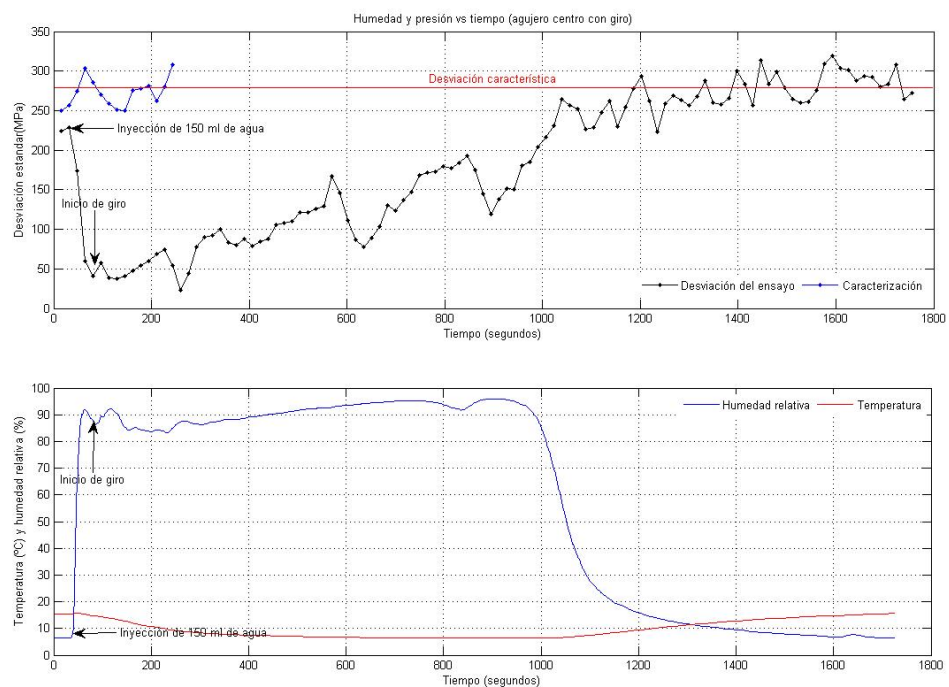


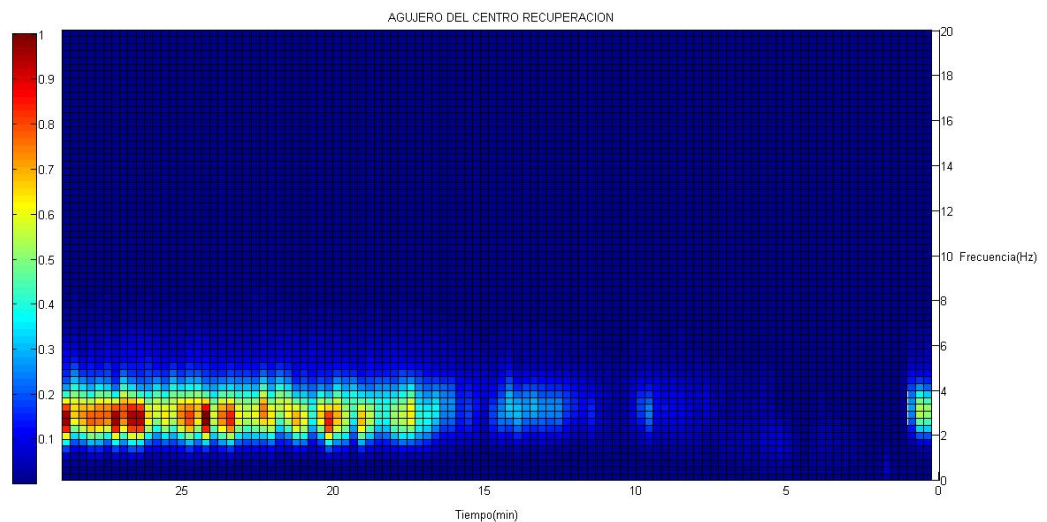
Figura 42. Variación de la humedad y la desviación estándar con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero del centro y con giro del distribuidor.

En este caso se repite la zona de inyección pero se inicia el giro del distribuidor transcurrido un minuto desde la adición del agua. Contemplando la humedad se aprecia como esta se mantiene elevada y constante en el tiempo hasta la caída de la misma tras 1000 segundos desde el inicio del ensayo. Nuevamente este hecho parece estar ligado con la activación del giro del distribuidor, responsable de homogeneizar el lecho y provocando un secado uniforme de éste. Se alcanza la humedad inicial a los 1500 segundos, es decir 25 minutos, coincidiendo con la temperatura existen al comienzo.



## ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Observando la desviación para el ensayo, el inicio de giro conlleva un aumento en la misma lo que implica mayores fluctuaciones de presión en el sistema. Esta sufre las normales desviaciones y pero continúa con su aumento hasta alcanzar valores próximos a la característica a los 1200 segundos, 20 minutos, lo cuál indicaría que el lecho se encuentra seco y fluidizado, con un error correspondiente del 20%.

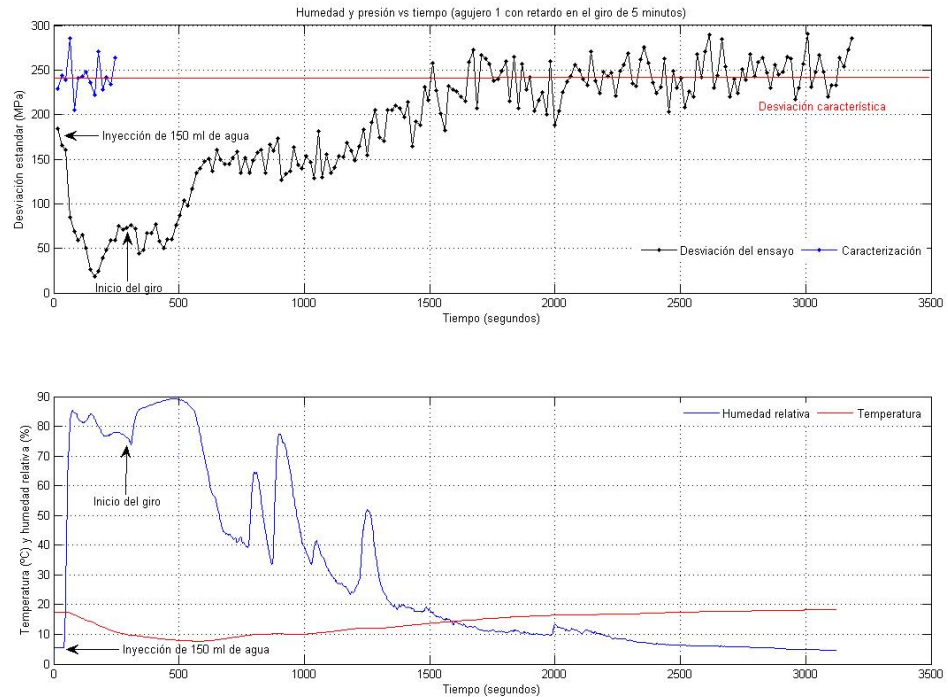


*Figura 43. Variación de la frecuencia característica con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero del centro y con giro del distribuidor.*

Para este ensayo, nuevamente la frecuencia característica del sistema es 3 Hz. Se puede ver como el lecho comienza a fluidizarse transcurrido 16 minutos, apreciándose valores de la potencia de Welch para la frecuencia característica. La potencia de Welch se hace máxima y constante en el tiempo a los 24 minutos del comienzo del ensayo, lo cuál indica que el lecho se encuentra completamente y fluidizado y seco, esto conlleva un error respecto a la realidad del 4%.

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

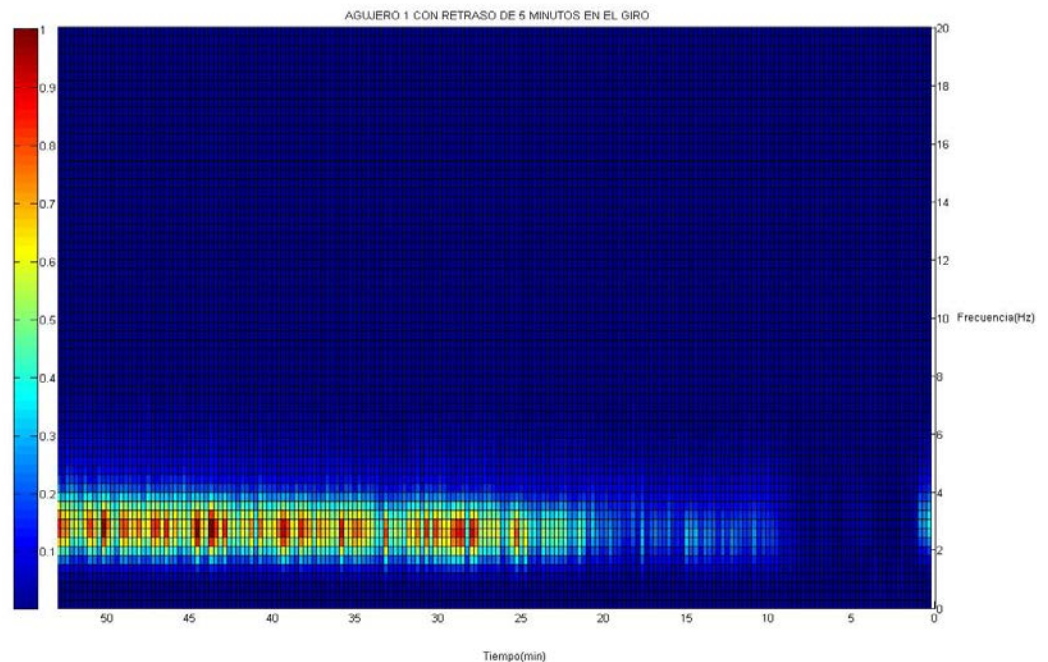
**Ensayo de lecho con retardo de 5 minutos en la recuperación con inyección de agua desde el agujero 1:**



*Figura 44. Variación de la humedad y la desviación estándar con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero 1 y con retraso de 5 minutos en el inicio del giro del distribuidor*

Para este ensayo el agua es inyectada desde un agujero próximo a la pared del lecho y el giro del distribuidor es iniciado a los 5 minutos desde la adición del agua. Analizando la evolución de la humedad, el giro propicia la redistribución de la humedad seguida de la bajada de la misma. A su vez en este descenso aparecen amplios picos de humedad, relacionados nuevamente con la ruptura de grandes aglomerados, que para este caso son más abundantes que en los anteriores. Según se acerca a la humedad inicial pequeños aglomerados la hacen oscilar hasta que alcanzados los 2600 segundos, 43 minutos, se puede aseverar que el lecho está seco.

Analizando los resultados para la desviación estándar del proceso de secado, no se aprecia relación alguna entre el inicio del giro del distribuidor la desviación. Comparando la gráfica de humedad se puede apreciar que comienza la fluidización acorde la humedad comienza a disminuir de forma notable. Según este parámetro el lecho vuelve a estar fluidizado y por tanto seco al cabo de 1500 segundos, 25 minutos, lo cual implica un error respecto a la realidad del 42,3%.

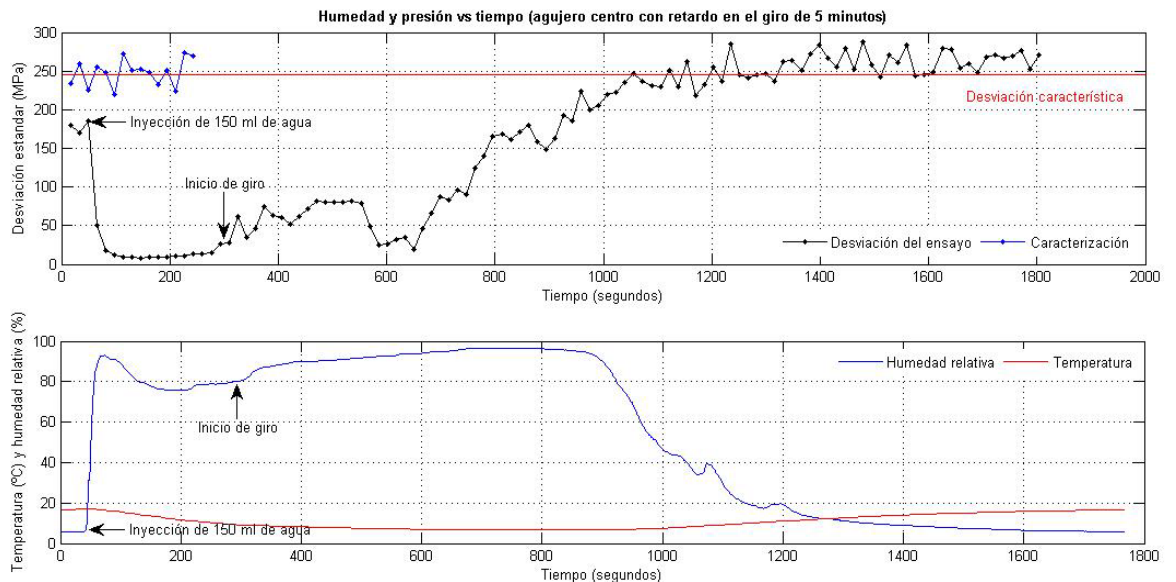


*Figura 45. Variación de la frecuencia característica con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero 1 y con retraso de 5 minutos en el inicio del giro del distribuidor.*

Nuevamente el peridograma muestra la frecuencia existente a lo largo del ensayo y la frecuencia característica del lecho, 3 Hz. Aparecen 2 tramos en los que la potencia de Welch se hace máxima y constante. El primero se produce a los 28 minutos y coincide con la desaparición de los grandes aglomerados existentes en el lecho. Posteriormente el la potencia de Welch durante unos minutos, lo cuál indica una pequeña desfluidización del lecho. Esto coincide con la ruptura de los pequeños aglomerados residuales. El segundo tramo donde la potencia de Welch se hace máxima y permanente ocurre a los 43 minutos desde el inicio del ensayo, coincidente este tiempo con el obtenido en base a la humedad relativa.

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

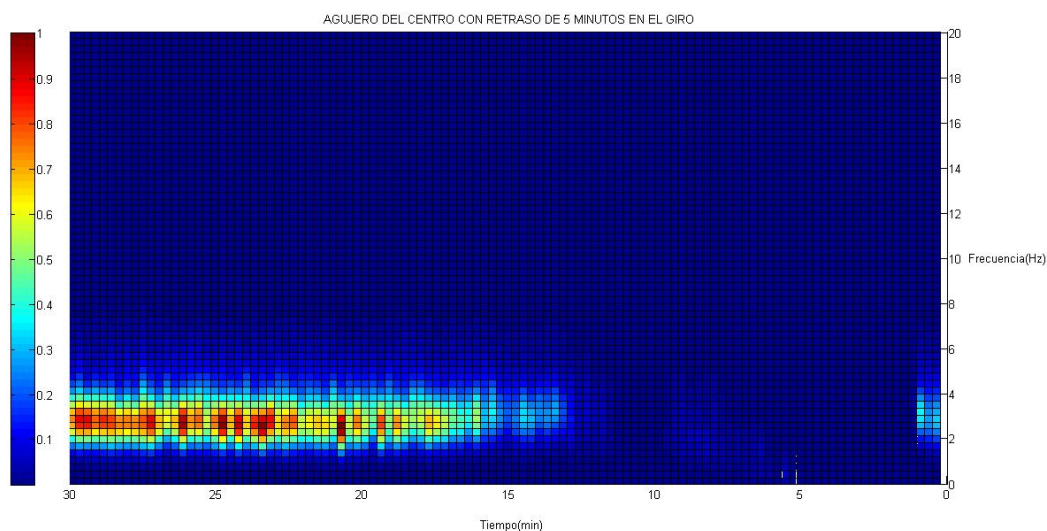
**Ensayo de lecho con retardo de 5 minutos en la recuperación con inyección de agua desde el agujero central:**



*Figura 46. Variación de la humedad y la desviación estándar con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero centro y con retraso de 5 minutos en el inicio del giro del distribuidor*

Para este ensayo la inyección de agua se realiza desde el agujero central y el inicio de giro comienza con 5 minutos de retardo respecto a la adición de agua. Observando la curva de la humedad relativa se aprecia como nuevamente el giro propicia una redistribución de la humedad y homogeneiza el lecho. La humedad comienza el descenso transcurridos 900 segundos, un descenso tenue y constante salvo por la aparición de pequeños aglomerados existentes en el lecho. Para este ensayo se obtiene la humedad inicial al cabo de 1500 segundos, 25 minutos.

Analizando la desviación estándar durante el proceso de secado, se aprecia como el giro proporciona un primer estado leve de fluidización, para posteriormente caer a medida que el lecho se homogeneiza, formándose una pequeña torta de arena húmeda en la parte superior del lecho. A medida que la torta va desapareciendo la desviación estándar alcanza el su valor característico coincidiendo con el comienzo en el descenso de la humedad. Según las medidas de desviación estándar el lecho se encuentra fluidizado y seco transcurridos 1200 segundos, 20 minutos, desde el inicio del ensayo, lo cual conlleva un error respecto a la medida basada en la humedad del 20 %.



*Figura 47. Variación de la frecuencia característica con el tiempo. Con inyección de agua en el agujero del centro y con retraso de 5 minutos en el inicio del giro del distribuidor.*

Nuevamente analizando el periograma para este ensayo, se obtiene una frecuencia característica de 3 Hz. Se puede observar como en el momento de inicio del giro se obtienen pequeños valores para la potencia de Welch a bajas frecuencias, lo que podría indicar una pequeña fluidización de un sector del lecho. A los 16 minutos el lecho por completo comienza a fluidizarse, obteniéndose un valor máximo y constante de la potencia de Welch transcurrido 23 minutos, lo que conlleva un error del 8%.

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Resumen de los resultados obtenidos:

Ensayo	Desviación característica (MPa)	Tiempo según desviación (min)	Tiempo según frecuencia característica (min)	Tiempo según humedad relativa (min)
Estático con inyección en agujero 1	230	37	41	42
Recuperación del lecho con inyección en agujero 1	295	23	30	30
Estático con inyección en el agujero central	298	20	26	27
Recuperación del lecho con inyección agujero central	275	20	24	25
Retardo en la recuperación inyección agujero 1	245	25	43	43
Retardo recuperación inyección agujero central	249	20	23	25

Tabla 3. Resumen de tiempos de secado para cada estimación.



## 8.CONCLUSIONES

Durante el desarrollo del presente proyecto se han adquirido diversos conocimientos sobre la fluidización, sus propiedades y posibles usos, así mismo se han aplicado los conocimientos adquiridos para realizar una caracterización experimental del proceso. Por tanto tras su realización se pueden enumerar las siguientes conclusiones y mejoras para el futuro al trabajo realizado.

En primer lugar, en cuanto a los métodos teóricos consultados y los experimentales aplicados se han obtenido las siguientes conclusiones:

- ✓ Los métodos experimentales utilizados han demostrado ser de gran validez y fácil desarrollo e implantación.
- ✓ La obtención de la velocidad mínima de fluidización por el método de la desviación típica resulta de gran utilidad y fácil aplicación, obteniéndose resultados de gran exactitud.
- ✓ El análisis de la recuperación de la fluidización del lecho se hace complejo aplicando las teorías de la desviación típica. Por el contrario usando el análisis por medio de la frecuencia característica del lecho se obtienen resultados de gran exactitud, haciendo de este método el más fiable de los estudiados.

En segundo lugar, se describen las conclusiones obtenidas respecto a la recuperación del lecho y la influencia del giro del distribuidor al lecho:

- ✓ La velocidad y por tanto el caudal necesario para fluidizar el lecho resulta mayor para el distribuidor en movimiento, debido a que produce mayores pérdidas de carga.
- ✓ A su vez la aparición del giro del distribuidor apenas se ve reflejado en la frecuencia característica del lecho, pudiéndose está considerar la misma en ambos casos.
- ✓ El giro proporciona mejores tiempos de recuperación que el lecho en estático, debido a que distribuye mejor el aire por todo el lecho aumentando de este modo el secado.
- ✓ El giro provoca una mejor distribución de la humedad en el lecho, lo cual implica una caída del mismo más brusca que en estático, pero evita la aparición de aglomerados de gran tamaño y por tanto, se obtiene un menor tiempo de recuperación. Este hecho también se ve favorecido.

Por último, como posibles mejoras y futuros estudios se proponen:

## ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

---

- ✓ El estudio del tiempo de recuperación del lecho para distintas velocidades de giro del plato distribuidor.
- ✓ Construir un lecho con menor contacto con el aire para proporcionar mejores resultados de humedad, de forma que se pueda caracterizar el mismo.



## 9.BIBLIOGRAFÍA

- [1] Daizo Kunii, Octave Levenspiel, FLUIDIZATION ENGINEERING second Edition. Butterworth-Heinemann 1991.
- [2] J.F. Davidson, D. Harrison, FLUIDISED PARTICLES. Cambridge University Press 1963.
- [3] Derek Wilkinson, DETERMINATION OF MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY BY PRESSURE FLUCTUATION MEASUREMENT. Canadian journal of chemical engineering 1995.
- [4] Felipe, PREDICTION OF MINIMUM FLUIDIZATION VELOCITY OF GAS-SOLID FLUIDIZED BEDS BY PRESSURE FLUCTUATION MEASUREMENTS — ANALYSIS OF THE STANDARD DEVIATION METHODOLOGY.
- [5] Malte Bartels, Weigang Lin, John Nijenhuis, Freek Kapteijn, J. Ruud van Ommen, AGGLOMERATION IN FLUIDIZED BEDS AT HIGH TEMPERATURES: MECHANISMS, DETECTION AND PREVENTION.
- [6] J. Ruud van Ommen, Srdjan Sasic, John van der Schaaf, Stefan Gheorghiu, Filip Johnsson, Marc-Olivier Coppens f . Time-series analysis of pressure fluctuations in gas-solid fluidized beds.
- [7] Taylor & Francis group, HANDBOOK OF INDUSTRIAL DRYING. 2006.
- [8] Hiroyuki Kage, Michiyo Agari, Hironao Ogura, Yoshizo Matsuno, FREQUENCY ANALYSIS OF PRESSURE FLUCTUATION IN FLUIDIZED BED PLENUM AND ITS CONFIDENCE LIMIT FOR DETECTION OF VARIOUS MODES OF FLUIDIZATION. Department of Applied Chemistry, Kyushu Institute of Technology, 2000
- [9] M. Punochar, J. Drahos, J. Cermak, K. Seluchy, EVALUATION OF MINIMUM FLUIDIZING VELOCITY IN GAS FLUIDIZED BED FROM PRESSURE FLUCTUATIONS. Institute of Chemical Process fundamentals 1984.
- [10] Verloop J. And Heertjes P.M. PERIOD PRESSURE FLUCTUATIONS IN FLUIDIZED BEDS. Chem. Eng. 1974
- [11] Celia Sobrino, J.A. Almendros-Ibañez, D. Santana, M. de Vega. FLUIDIZATION OF GROUP B PARTICLES WITH A ROTATING DISTRIBUTOR. Departamento de ingeniería térmica y de fluidos, Universidad Carlos III. 2007

## ANEXO (HOJA DE CARACTERÍSTICAS)

## Electronics & Software



## Charge Meter

Type 5015A...

### Universally Applicable for Piezoelectric Measuring Technology

This instrument can be used wherever mechanical quantities are measured with piezoelectric sensors. Piezoelectric sensors produce an electric charge which varies in direct proportion to the load acting on the sensor.

- Single-channel charge amplifier
- Piezotron® input (option)
- Measure-jump compensated
- Liquid crystal display (128x128 pixels)
- Menu-driven operation
- Direct signal evaluation
- Flexible adjustment of high-pass and low-pass filters
- Compatible with Charge Amplifier Type 5011B...
- PC-Software and Virtual Instrument Driver for LabVIEW™



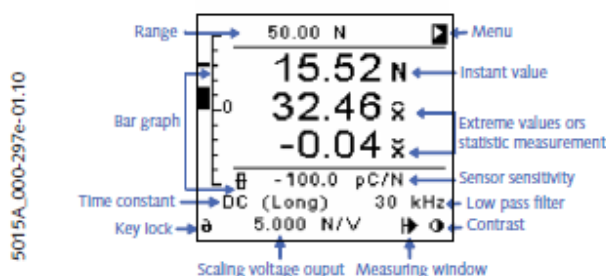
#### Description

The Type 5015A... is not only a charge amplifier but an universal Charge Meter with a graphical liquid crystal display. However, the 19"-rack module is also suitable for measurements in an industrial environment. It can display instantaneous, peak and average values as well as reference deviations. State-of-the-art technology allows the naturally occurring interference to be almost entirely eliminated. The instrument is distinguished firstly by its excellent technical data and secondly by its extremely simple operation.

#### Application

The instrument has been designed for use in research, development and the laboratory.

#### Operation



#### Technical Data

##### Charge Input

Connector Type	BNC neg.	
Measuring range FS	pC	±2 ... 2 200 000
Measuring error		
Range FS <10 pC	%	<±3
Range FS <100 pC	%	<±1
Range FS ≥100 pC	%	<±0,5
Drift, measuring mode DC (Long)		
at 25 °C, max. relative humidity RH of 60 % (non-condensing)	pC/s	<±0,03
at 25 °C, max. relative humidity RH of 70 % (non-condensing)	pC/s	typ. <±0,05
at 50 °C, max. relative humidity RH of 50 % (non-condensing)	pC/s	<±0,3
Max. common mode voltage between input and output ground	V	<±30
Overload	%FS	≈±105

##### Voltage Input (Piezotron®)

Connector Type	BNC neg.	
Measuring range FS	mV	±2 ... 20 000
Measuring error		
Range FS <10 mV	%	<±3
Range FS <100 mV	%	<±1
Range FS 100 mV	%	±0,5

Page 1/6

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Charge Meter – Universally Applicable for Piezoelectric Measuring Technology, Type 5015A...

**KISTLER**  
measure, analyze, innovate.

Drift, measuring mode voltage DC (long) (@ Range 10 V FS; Gain = 1)		
at 25 °C, max. relative humidity RH of 60 % (non-condensing)	mV/s	<±0,03
at 50 °C, max. relative humidity RH of 50 % (non-condensing)	mV/s	<±0,3
Max. common mode voltage between input and output ground	V	<±30
Overload	%FS	≈±105
Piezotron mode		
Supply current	mA	4 ±10 %
Input voltage swing	V	0 ... 20

## Voltage Output

Connector Type	BNC neg.	
Output range FS	V	±10/±5/±2,5/±2
Output current	mA	<±2
Output impedance		≈10
Measure-jump	Compensated	
Measure-jump	mV	<±3
Correction time, inclusive reed-relay delay time	ms	<15 <sup>1)</sup>
Zero errors	mV	<±2

## Output interference (0,1 Hz ... 1 MHz), Type 5015Axxx0

Range FS, LP filter off		
2,000 ... 9,999 pC	mVpp	<140 ... <40
10,00 ... 99,99 pC	mVpp	<30 ... <10 <sup>1)</sup>
100,0 ... 999,9 pC	mVpp	<15 ... <7 <sup>1)</sup>
...	mVpp	<15 ... <7 <sup>1)</sup>
0,220 ... 2,200 nC	mVpp	<15 ... <7 <sup>1)</sup>
Range FS, LP filter 30 kHz		
2,000 ... 9,999 pC	mVpp	<60 ... <20
10,00 ... 99,99 pC	mVpp	<20 ... <7 <sup>1)</sup>
...	mVpp	<10 ... <5 <sup>1)</sup>
0,220 ... 2,200 nC	mVpp	<10 ... <5 <sup>1)</sup>

## Output interference (0,1 Hz ... 1 MHz), Type 5015Axxx1

Range FS, LP filter off		
2,000 ... 9,999 pC, mV	mVpp	<220 ... <50
10,00 ... 99,99 pC, mV	mVpp	<50 ... <12 <sup>1)</sup>
100,0 ... 999,9 pC, mV	mVpp	<20 ... <7 <sup>1)</sup>
...	mVpp	<20 ... <7 <sup>1)</sup>
0,220 ... 2,200 nC	mVpp	<20 ... <7 <sup>1)</sup>
Range FS, LP filter 30 kHz		
2,000 ... 9,999 pC, mV	mVpp	<180 ... <50 <sup>1)</sup>
10,00 ... 99,99 pC, mV	mVpp	<30 ... <10 <sup>1)</sup>
100,0 ... 999,9 pC, mV	mVpp	<10 ... <5 <sup>1)</sup>
...	mVpp	<10 ... <5 <sup>1)</sup>
0,220 ... 2,200 nC	mVpp	<10 ... <5 <sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Values valid from MCC version V2.xx

## Frequency Response

DC (Long), LP-filter off		
Bandwidth (-3 dB)	kHz	=0 ... 200
Group delay	µs	≈10

## High-pass Filter (1<sup>st</sup> order)

Analog high-pass filter		
DC (Long)		
Range FS Charge, (Voltage)		
2 pC, (mV)	s	10 000
1 000 pC, (mV)	s	100 000
Time constants		
Medium	s	10/100/1 000/2 200
Short	s	0,1/1/10/220
Tolerance	%	<±20

## Digital high-pass filter computed by DSP

Time constants		
Range FS Charge, (Voltage)		
2 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1
100 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1/10
1 000 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1/10/100
10 000 pC, (mV)	s	0,01/0,1/1/10/100
Tolerance	%	<±20
Cutoff frequencies		
-3 dB	Hz	16/1,6/0,16/0,016/0,0016
-10 %	Hz	30/3/0,3/0,03/0,003
-5 %	Hz	50/5/0,5/0,05/0,005
-1 %	Hz	100/10/1/0,1/0,01

## Low-pass Filter

Digital low-pass filter computed by DSP		
Filter Type	IIR, linear Phase	
Order	2. or 5.	
Cutoff frequency (-3 dB)	Hz	5 ... 30 000
Steps	1/2/3/5	
Tolerance	%	<±10

## Signal Evaluation

Sample rates		
LP-filter on	ksps	400
LP-filter off	ksps	1 000
Minimum pulse width for peak-peak value detection		
LP-filter 5 Hz ... 30 Hz	µs	>2 500
LP-filter 50 Hz ... 300 Hz	µs	>250
LP-filter 500 Hz ... 3 kHz	µs	>25
LP-filter 5 kHz ... 30 kHz	µs	>2,5
LP-filter off	µs	>1

5015A\_000-297e-01.10

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

Page 2/6

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Charge Meter – Universally Applicable for Piezoelectric Measuring Technology, Type 5015A...

**KISTLER**  
measure, analyze, innovate.

Max. integration time for mean value	min	<75
Integration time for the updating rate of the liquid crystal display		
Instant value	ms	300
Characteristic values	ms	300
Bar graph	ms	17,5

## Remote Control

Connector Type	MiniDin round socked		
Pin allocation			
Inputs with internal pull-up resistor			
Pin 4 (input)	Window (remote)		
Pin 5 (input)	Measure (remote)		
Pin 6	DGND		
Input voltage			
logic inactive or input open	V	3,5 ... 30	
logic active	V(mA)	0 ... 1 (0 ... 4)	
Delay time			
Window (remote)	ms	<0,5	
Measure (remote)	ms	<15	

## Digital Measuring Data Transfer

The instrument provides a continuous measuring data transfer via the serial interface to a PC. For this the PC software (Windows®) of the VI driver (LabVIEW™) is required. This feature is not available on the IEEE-488 interface.

Sampling rates	ksps	0,1/0,25/0,5/1
----------------	------	----------------

## RS-232C Interface (Electrically Separated)

EIA-standard		RS-232C
Connector Type		DB-9S (D-Sub)
Pin allocation		
Pin 2		RxD
Pin 3		TxD
Pin 5		SG
Max. cable length at		
9 600 bps	m	<15
19 200 bps	m	<15
38 400 bps	m	<12
57 600 bps	m	<10
115 200 bps	m	<5
Max. input voltage, continues	V	<±20
Max. voltage between signal ground and protective ground		
	V <sub>RMS</sub>	<20
Baud rates	bps	1 200/9 600/ 19 200/38 400/ 57 600/115 200

Data-bit	8
Stop-bit	1
Parity	none
SW handshake	none

## IEEE-488 Interface (Option)

Standard	IEEE-488.1-1987	
Connector Type	Microribbon series 57 (24-pole)	
Max. distance between devices	m	2
Max. bus length	m	20
Max. number of devices		15
Address range		0 ... 30
Functions	Listener and Talker	
Interface functions	SH1, AH1, L4, LEO, T6, TE0, SR1, RL2, PP0, DC1, DT1, C0, E1	
Multiline commands	DCL, SDC, GET, UNL, UNT, SPE, SPD	
Uniline commands	IFC, REN, EOI, SRQ, ATN	

Windows® is a registered trademark of Microsoft Corporation

5015A\_000-297e-01.10

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

Page 3/6

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Charge Meter – Universally Applicable for Piezoelectric Measuring Technology, Type 5015A...

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

## Power Supply Connection

Power plug (2P+E, protection class I)	IEC 320C14
Supply voltage settable	V~ 115/230
Supply voltage tolerance	% -22, +15
Supply frequency	Hz 48 ... 62
Consumption	VA ~20
Voltage between Signal ground and protective ground	V <sub>RMS</sub> <50
Fuses	
F1 (slow)	mA 100
F2 (slow)	mA 100

## Remaining Data

IP-Degree of protection	IP40, IEC 60529
Operating temperature	°C 0 ... 50
Storage temperature	°C -10 ... 70
Rel. humidity, not condensing	% 10 ... 80
Vibration steadiness (20 Hz ... 2 kHz, duration 16 min, cycle 2 min.)	g <10
Shock steadiness (1 ms)	g <200
Housing dimensions	
with frame (wxhxd)	mm 105,3x142x253,15
without frame (wxhxd)	mm 71,12x128,7x230
Front panel (according DIN 41494, part 5)	HT/TE 3/14
Weight	kg ~2,3

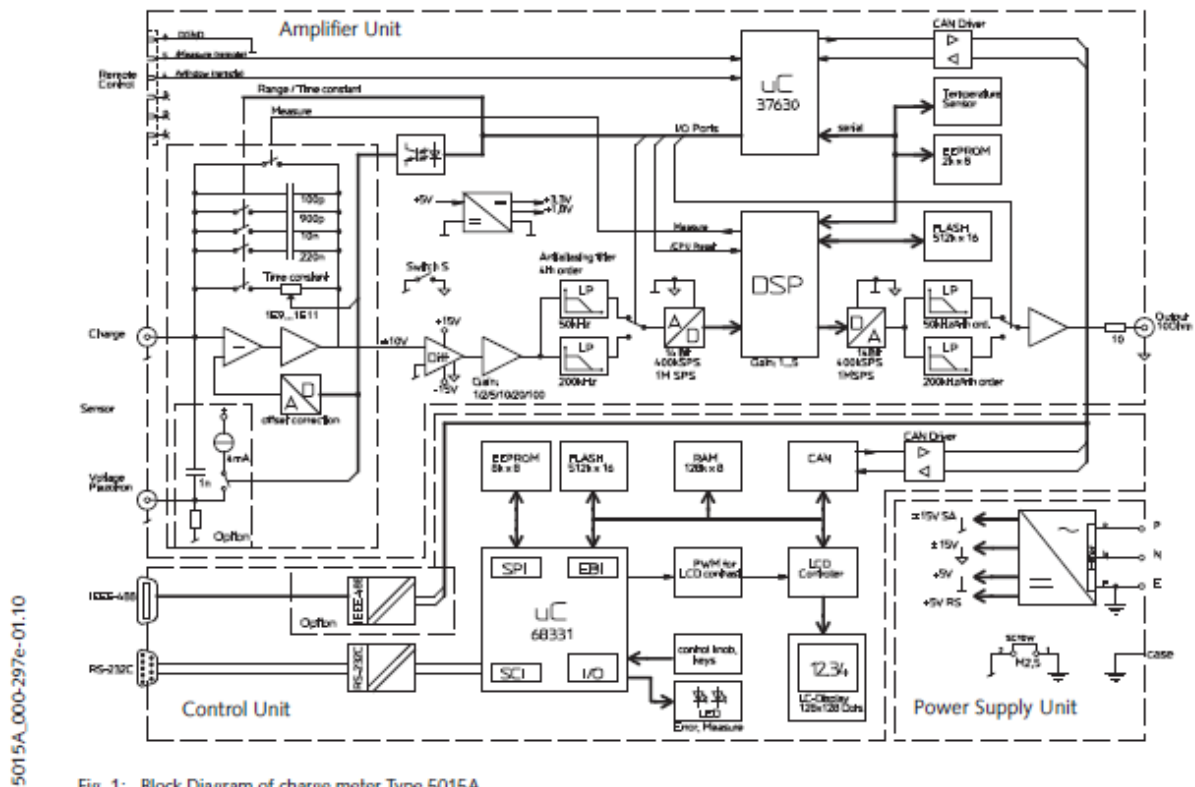


Fig. 1: Block Diagram of charge meter Type 5015A...

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com

# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Charge Meter – Universally Applicable for Piezoelectric Measuring Technology, Type 5015A...

**KISTLER**  
measure, analyze, innovate.

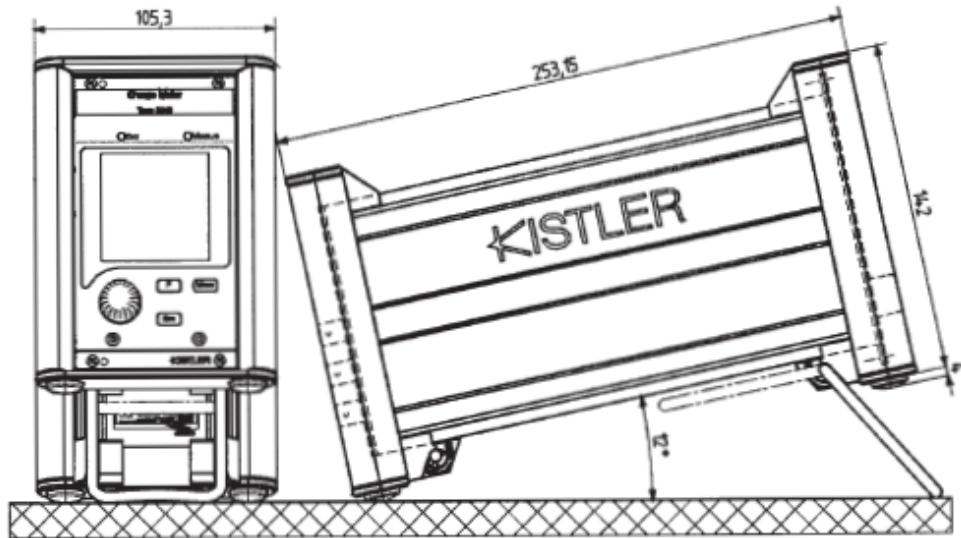


Fig. 2: Desktop Type 5015A1... (stackable)

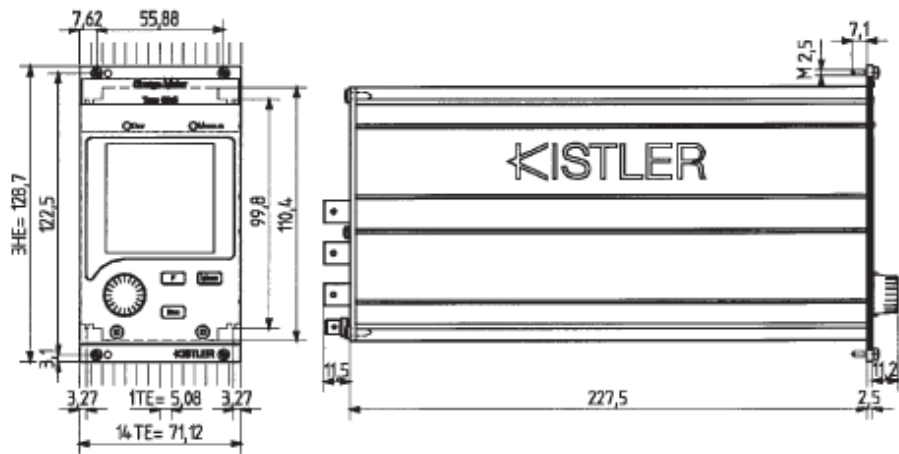


Fig. 3: 19"-Rack plug-in Type 5015A0...

5015A\_000-297e-01.10

Page 5/6

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com



# ESTUDIO AGLOMERACIÓN LECHO FLUIDIZADO

Charge Meter – Universally Applicable for Piezoelectric Measuring Technology, Type 5015A...

**KISTLER**  
measure. analyze. innovate.

## Included Accessories

Charge Meter Type 5015A... with

- Country-specific power cord
- Plug for 'Remote Control'
- Self-adhesive label with supply voltage details
- Flash-Loader with current firmware
- Demo-Program for visualization of the display on a PC
- PC-Software and VI-Driver for LabVIEW™ for the equipment configuration and measured data acquisition
- Instruction manual
- Calibration sheet

## Optional Accessories

- RS-232C cable, l = 5 m, null-modem, DB-9P/DB-9S
- or PC-link cable RS-232C, l = 3 m, DB-25P/DB-9S
- with suitable D-Sub adapter, DB-9P/DB-25S

## Type/Art. No.

1200A27

1465A3

1479

## Instrument Configurations

The complete type designation of the Charge Meter is made up of the basic type designation Type 5015A... and four additional digits.

The basic type contains a single-channel Charge Meter (with charge input for piezoelectric sensors) with display unit and RS-232C interface in the following versions:

## Ordering Key

Type 5015A					
Size/Measuring Range					
19" rack module version according to DIN 41494; width 14 TE and height 3 HE	0				
Desktop version with support bracket	1				
Without interface option		0			
With IEEE-488 interface (option)		1			
Adjusted in the factory to 230 V-; switching to 115 V-supply by the user possible at any time		0			
Adjusted in the factory to 115 V-; switching to 115 V-supply by the user possible at any time		1			
Without voltage input		0			
With voltage input for sensors with integrated Piezotron® circuitry (option)		1			

5015A\_000-297e-01.10

Page 6/6

This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com